



Regionalización de caudales máximos en cuencas hidrográficas de la Provincia de Entre Ríos

María Inés Mastaglia
Rodolfo Sato
Tomas Kohan
Roxana Ramírez
Andrea Margasin
Vanesa Giménez
Ángel Villaverde
Diana Skidelsky Spahn
Floriana Russian
Matías Bidegorry
Ricardo Grilli
Eliana Sturtz
Diego Kessler

Regionalización de caudales máximos en cuencas hidrográficas de la provincia de Entre Ríos

María Inés Mastaglia

Rodolfo Alejandro Sato

Tomas Kohan

Roxana Guadalupe Ramírez

Andrea Desiré Margasin

Vanesa Estefanía Giménez

Ángel Gabriel Villaverde

Diana Fernanda Skidelsky Spahn

Floriana Milagros Russian

Matías Bidegorry

Ricardo A. Grilli

Eliana Gabriela Sturtz

Diego Kessler

edUTecNe

Paraná, 2022

Regionalización de caudales máximos de la provincia de Entre Ríos / Tomás Kohan... [et al.]; editado por Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2022.

Libro digital, PDF
Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8992-10-5

1. Hidrología. 2. Entre Ríos. I. Kohan, Tomás. II. Cejas, Fernando, ed.

CDD 551.480982

Edición y Diseño: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Ruben Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretario de Cultura Y Extensión Universitaria: Ing. Federico Olivo Aneiros



Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Paraná

Decano: Prof. Mg. Ing. Alejandro Carrere

Vicedecano: Ing. Alejandro Jerichau



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando Cejas

Dirección General: Mg. Claudio Véliz

Dirección de Cultura y Comunicación: Ing. Pablo Lassave

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2018

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina



ISBN 978-987-4998-61-3



Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Paraná

Proyecto de Investigación

“Regionalización de caudales máximos en cuencas hidrográficas de la provincia de Entre Ríos”

Autores

Mg. Ing. María Inés Mastaglia

Mg. Ing. Rodolfo Alejandro Sato

Ing. Tomas Kohan

Dra. Ing. Roxana Guadalupe Ramírez

Ing. Andrea Desiré Margasin

Ing. Vanesa Estefanía Giménez

Ing. Ángel Gabriel Villaverde

Ing. Diana Fernanda Skidelsky Spahn

Ing. Floriana Milagros Russian

Ing. Matias Bidegorry

Ing. Ricardo A. Grilli

Ing. Eliana Gabriela Sturtz

Ing. Kessler Diego

Introducción

Área de estudio

Métodos utilizados

Cuenca del arroyo Feliciano

Cuenca del río Gualeguaychú

Investigación a nivel provincial

Discusión de resultados

Conclusiones y consideraciones finales

1. Introducción

Uno de los principales problemas que se presentan en el diseño de las obras hidráulicas en la provincia de Entre Ríos es la falta de información hidrológica para realizar una correcta estimación de los caudales de diseño.

El dimensionamiento adecuado de estructuras hidráulicas requiere el conocimiento de los caudales máximos que debe soportar la estructura (Cassalho et al., 2017). En la estimación de caudales de diseño, cuando no se dispone de una estación de aforo en el lugar de análisis donde se emplazará la obra, suelen utilizarse modelos de transformación de lluvia-caudal a los efectos de obtener los caudales picos de diseño en base a una determinada tormenta de diseño (Daniil & Lazaridis, 2005). La precisión de los resultados de los modelos depende de la calibración y validación de los mismos, tarea que no siempre es factible debido a la escasez de estaciones de aforo en la provincia y en consecuencia se presenta incertidumbre acerca de la precisión de los resultados de los modelos.

Muchas obras hidráulicas ejecutadas de manera correcta pueden fallar por la ocurrencia de caudales que superan los estimados, generando inundaciones o roturas con las consecuentes pérdidas económicas. Por el contrario, en otros casos se puede llegar a un sobredimensionamiento de las obras debido a una sobrestimación de los caudales de diseño. En las Figura 1.1 a Figura 1.5 se muestran las inundaciones generadas por cinco de los cursos de agua de mayor importancia en la provincia debido al aumento de caudal luego de intensas y sostenidas precipitaciones registradas en los últimos años.



Figura 1.1. Inundación de arroyo Feliciano sobre Ruta Nacional N°12. Abril 2016.



Figura 1.2. Desborde arroyo Las Conchas. Ruta Nacional N°12. Marzo 2007.



Figura 1.3. Desborde del arroyo Nogoyá. Ruta Nacional N°11. Febrero 2016.



Figura 1.4. Inundación de río Gualeguaychú. Diciembre 2012.



Figura 1.5. Inundación de río Gualeguay. Abril 2016.

Una posibilidad para disminuir la incertidumbre en la estimación de caudales máximos en cuencas no aforadas es recurrir a técnicas de regionalización que permiten obtener información hidrológica en sitios sin datos o con poca información, a partir de otras áreas de comportamiento hidrológico semejante.

En cada región homogénea se analizan las variables que afectan en mayor medida al caudal máximo, para integrarlas en ecuaciones que permitan calcular, con un margen de error aceptable, el caudal de descarga para diferentes recurrencias (M. del C. Paris & Zucarelli, 2004).

El objetivo de la investigación fue obtener ecuaciones para la estimación de caudales máximos en la provincia de Entre Ríos, para cada una de las

regiones definidas como hidrológicamente homogéneas, que permitan calcular el valor de caudal máximo en función de variables de fácil determinación, en cada subcuenca. Los resultados de estas ecuaciones pueden ser utilizados como referencia para contrastar con los obtenidos mediante modelación hidrológica en cuencas no aforadas.

Se estudiaron dos grandes cuencas de la provincia de Entre Ríos, la cuenca del arroyo Feliciano y la cuenca del río Gualeguaychú, y además se realizó un estudio a nivel provincial, que se presenta en las secciones siguientes.

2. Área de estudio

2.1. Región geográfica

La Provincia de Entre Ríos, ilustrada en la figura 2.1 es parte de la Mesopotamia argentina. Tiene una superficie de 78.781 km² correspondiendo a una superficie tierra firme 66976 km² y 11805km a islas y tierras áreas anegadizas. Entre valle y valle se encuentran espacios zonas más elevadas, con aspecto de pequeñas lomadas que llegan a superar en algunos casos los 100 m de altura, las que forman barrancas sobre los ríos principales. Dichos valles trasladan sus aguas al río Paraná y al río Uruguay. Al sur de la provincia se observa una gran zona de sedimentación fluvial: el Delta.



Figura 2.1. Ubicación provincia de Entre Ríos.

2.2. Características climatológicas

El clima y la vegetación de Entre Ríos son esencialmente subtropicales. La temperatura media anual es superior a los 19° C y el índice de pluviometría se sitúa por encima de los 1.000 mm anuales. La variación climática se produce en el sentido del norte al sur, distinguiéndose dos regiones climáticas bien definidas: una subtropical sin estación seca y otra cálida.

2.2.1. Precipitación

Las precipitaciones anuales en Entre Ríos disminuyen en forma gradual de NE a SO desde los 1.400 mm a 1.000 mm. En el invierno las mayores lluvias se registran en la parte oriental de la provincia y las menores en la occidental. Lo contrario sucede en el verano donde las mayores lluvias se dan en la parte occidental. Es en el otoño donde la distribución espacial de las lluvias en la Provincia es más uniforme.

Se observa en la figura 2.2 en el sector subtropical húmedo de llanura donde la zona recibe la mayor cantidad de agua en el año, la precipitación varía entre 1.300 y 1.400 mm. Luego decrece gradualmente hasta los 1.000 mm en el extremo sur provincial.

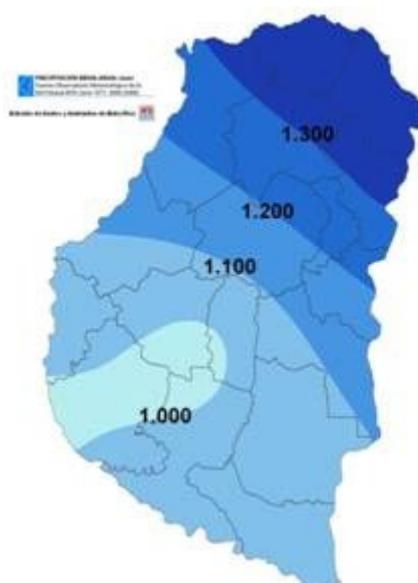


Figura 2.2. Nivel anual de precipitaciones de Entre Ríos.

En la Provincia se cuenta con dos estudios de precipitaciones para diseño hidrológico, uno es el estudio de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Concordia (FRC) con información de curvas Intensidad Duración frecuencia (IDF) para las estaciones meteorológicas de las ciudades de Paraná, Concordia y Concepción del Uruguay. El otro es el libro de la UTN Facultad Regional Paraná (FRP) sobre tormentas de diseño en cuencas extensas.

2.3. Hidrografía

La provincia de Entre Ríos cuenta con una nutrida red hidrográfica que la caracteriza, limitada por tres grandes ríos: el Paraná, el Uruguay y el Guayquiraró, y surcada por numerosos ríos y arroyos alimentados por importantes cuencas.

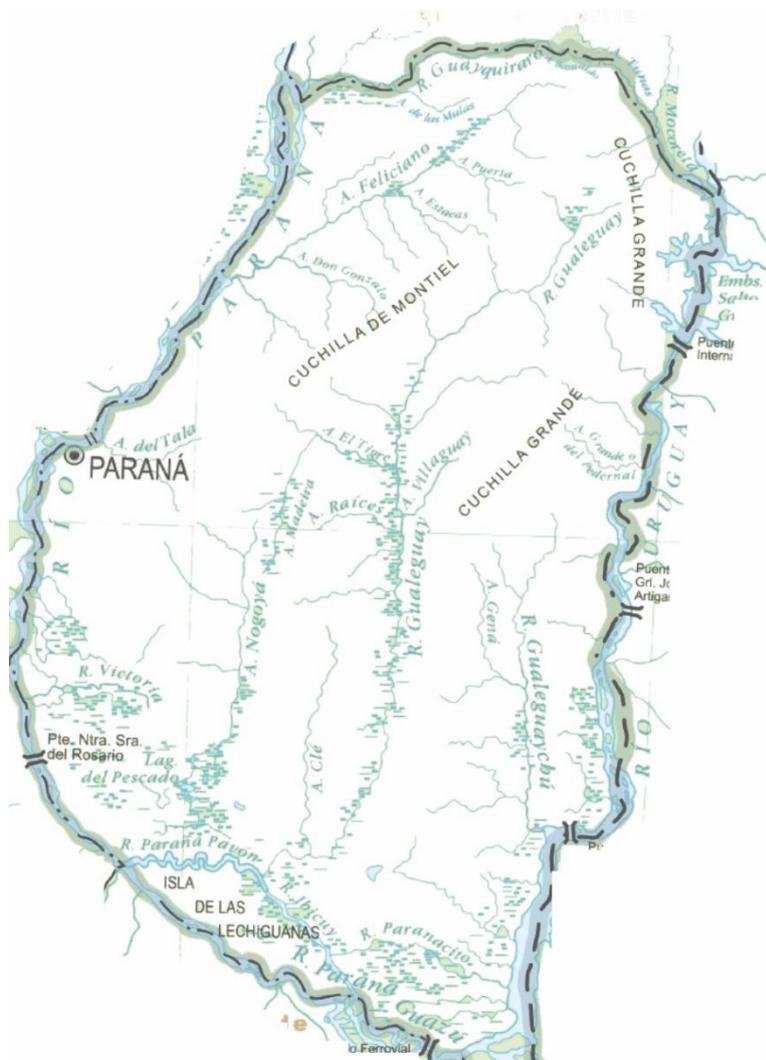


Figura 2.3. Hidrografía de Entre Ríos.

Sin embargo, los aforos son limitados, resultando así insuficientes para disponer de datos en puntos de interés donde se requiere conocer, por ejemplo, el caudal de diseño para una obra hidráulica. Actualmente, dentro del sistema de registro de caudales de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación hay aproximadamente 10 cuencas, en toda la provincia, que poseen estaciones de aforo de caudal, de las cuales, 6 poseen un mínimo de 20 años de registro histórico. Estas son:

- Cuenca del arroyo Feliciano
- Cuenca del río Gualeguaychú
- Cuenca del río Gualeguay
- Cuenca del arroyo Nogoyá
- Cuenca del arroyo Yuquerí Grande
- Cuenca del arroyo Guayquiraró

2.3.1. Cuenca del arroyo Feliciano

La cuenca del arroyo Feliciano está ubicada al noroeste de la provincia, como se ve en la Figura 2.4. La misma, tiene sus nacientes en la loma del Mocoretá. La cuenca se encuentra en la unidad morfológica cuchillas entrerrianas y está conformada por muchos meandros cuyo perfil de costa tipo varía de barrancas abruptas y profundas a taludes suaves en pequeñas distancias. (Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos, s. f.)

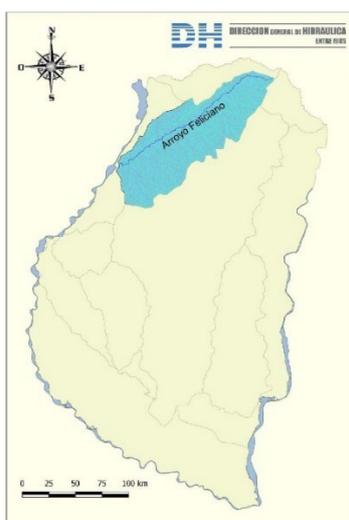


Figura 2.4. Ubicación de la cuenca del Arroyo Feliciano.

Tiene un solo afluente importante en el lado norte, el arroyo Estacas. Gran parte de esta cuenca está cubierta por montes naturales y serios problemas de erosión. La Figura 2.5, ilustración de los afluentes principales que desembocan en el cauce principal de la cuenca (Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos, s. f.).

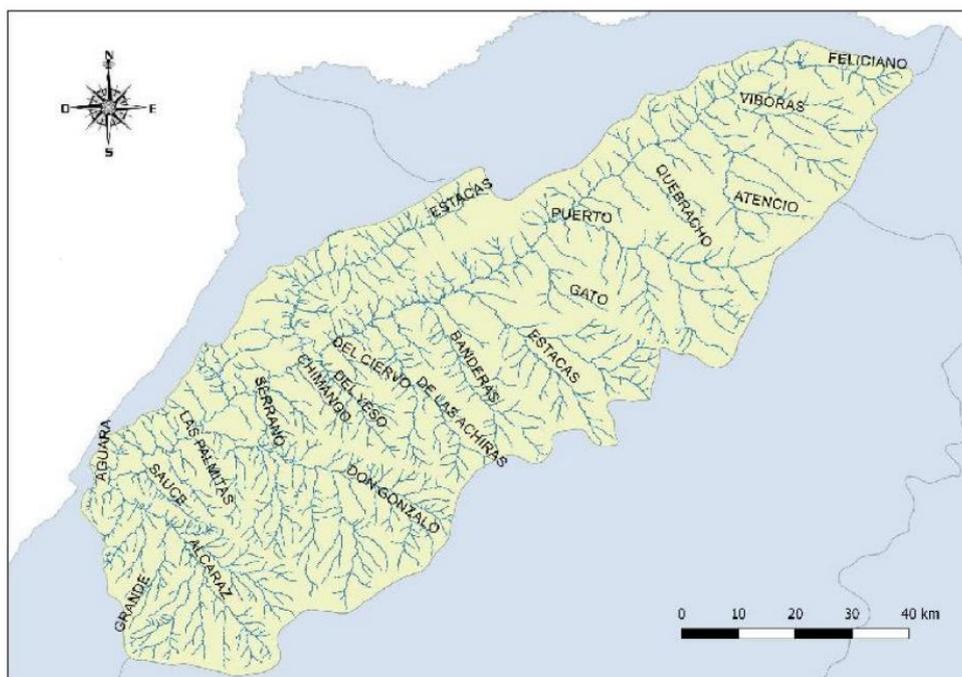


Figura 2.5. Afluentes principales del arroyo Feliciano.

La Figura 2.6 ilustra la estación de aforo en esta cuenca se encuentra en el "Paso Medina", en la intersección entre la ruta provincial N° 6 y el arroyo feliciano.

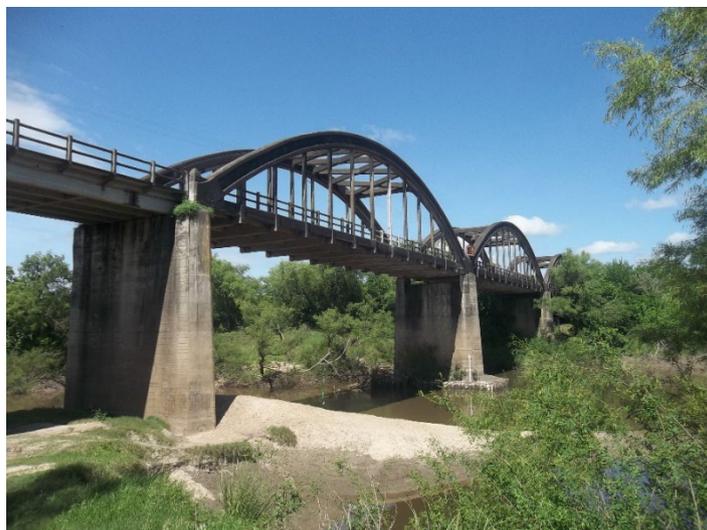


Figura 2.6. Estación de aforo Paso Medina.

2.3.2. Cuenca del río Gualeguaychú

En la Figura 2.7 se observa que la cuenca del río Gualeguaychú se encuentra en el sudeste de la provincia de Entre Ríos.

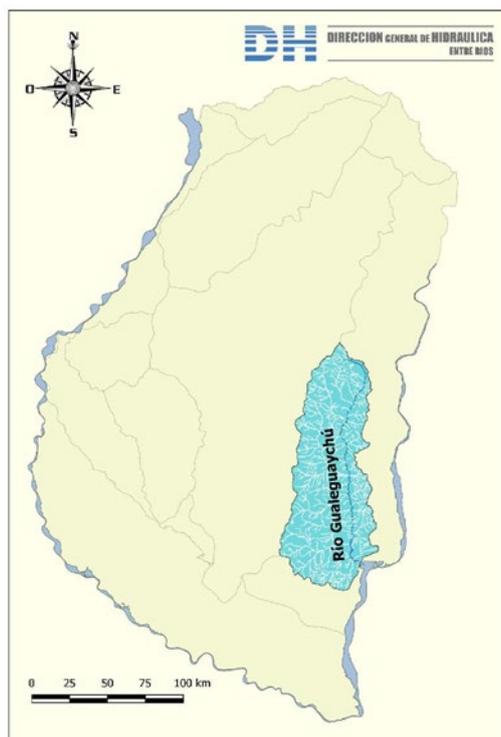


Figura 2.7. Ubicación de la cuenca del río Gualeguaychú en la provincia.

El río Gualeguaychú se desarrolla próximo al límite Este de su cuenca. Hacia la margen derecha del río se ubican los mayores afluentes de forma permanente, que de norte a sur son los siguientes: arroyo (Aº) San Miguel, Aº Santa Rosa, Aº Gená, Aº San Antonio, Aº El Gato, y el Aº Gualeyán. Sobre la margen izquierda, el río recibe aportes de arroyos más pequeños. En la figura 2.8 se observan los afluentes principales. (Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos, s. f.).

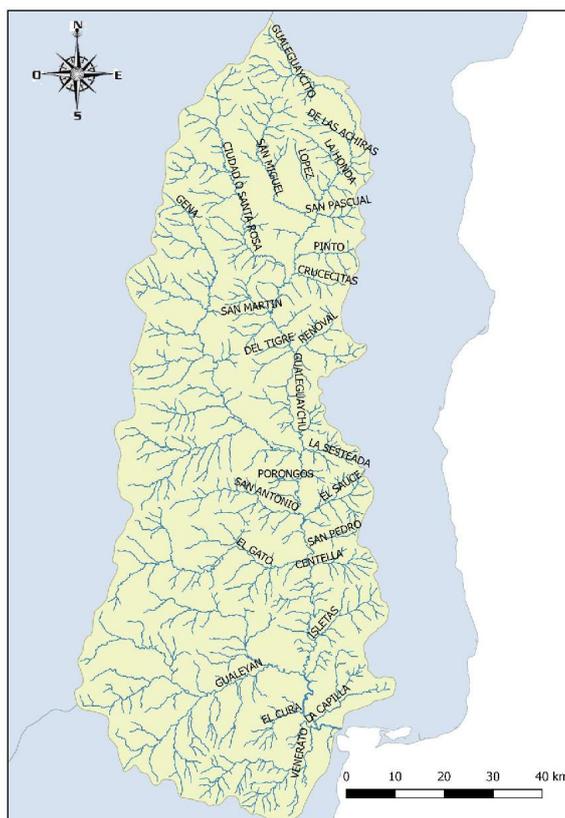


Figura 2.8. Cauces de aporte al Río Gualeguaychú.

La estación de aforo en esta cuenca, que se encuentra en el cruce de la Ruta Provincial N°39 con el río Gualeguaychú, en la porción centro-norte de la cuenca.

2.3.3. Cuenca del río Gualeguay

El río Gualeguay es el río más importante de la provincia de Entre Ríos, en su extensión total desde su nacimiento al norte hasta su desembocadura en el delta del Paraná en el sur, cubre aproximadamente un 30% de la superficie provincial, como se refleja en la Figura 2.9

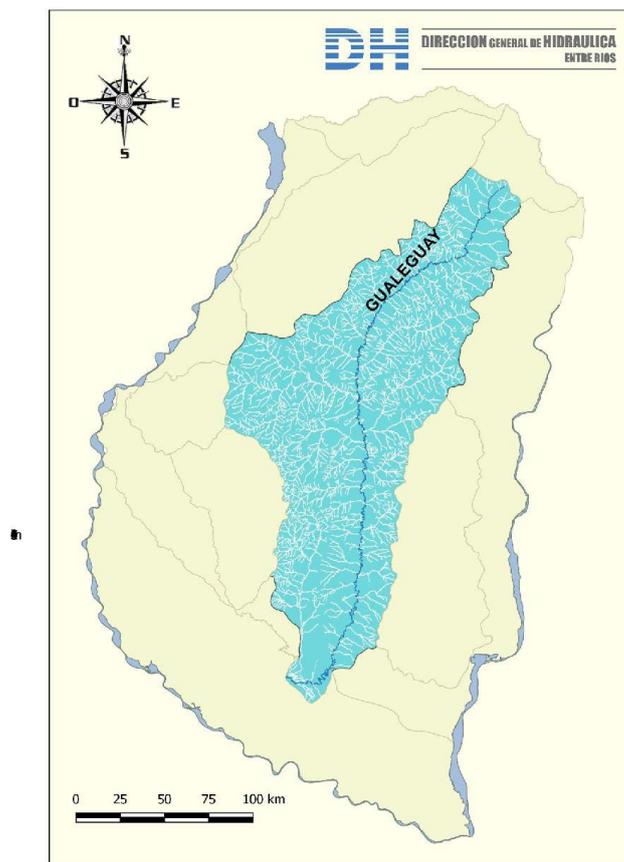


Figura 2.9. Ubicación de la cuenca del río Gualeguay en la provincia.

El curso principal puede dividirse en cuatro tramos bien definidos: el tramo superior cuyo origen se encuentra en las nacientes del río hasta un paraje llamado El Quebracho, el curso medio, desde el paraje El Quebracho hasta la ciudad de Rosario del Tala, el curso inferior que se extiende de la ciudad de Rosario de Tala hasta la ciudad de Gualeguay y recibe un gran número de afluentes de poco caudal manteniendo la orientación de norte a sur y, por último el tramo final, desde Gualeguay hasta la desembocadura en el río Paraná. Este tramo se torna meandroso debido al relieve, compuesto por una planicie de muy reducida pendiente y un lecho de suelos de deposición que la propia dinámica del río ha generado. La Figura 2.10 muestra los cauces de aportes al Río Gualeguay y su desembocadura en el Delta. (Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos, s. f.)

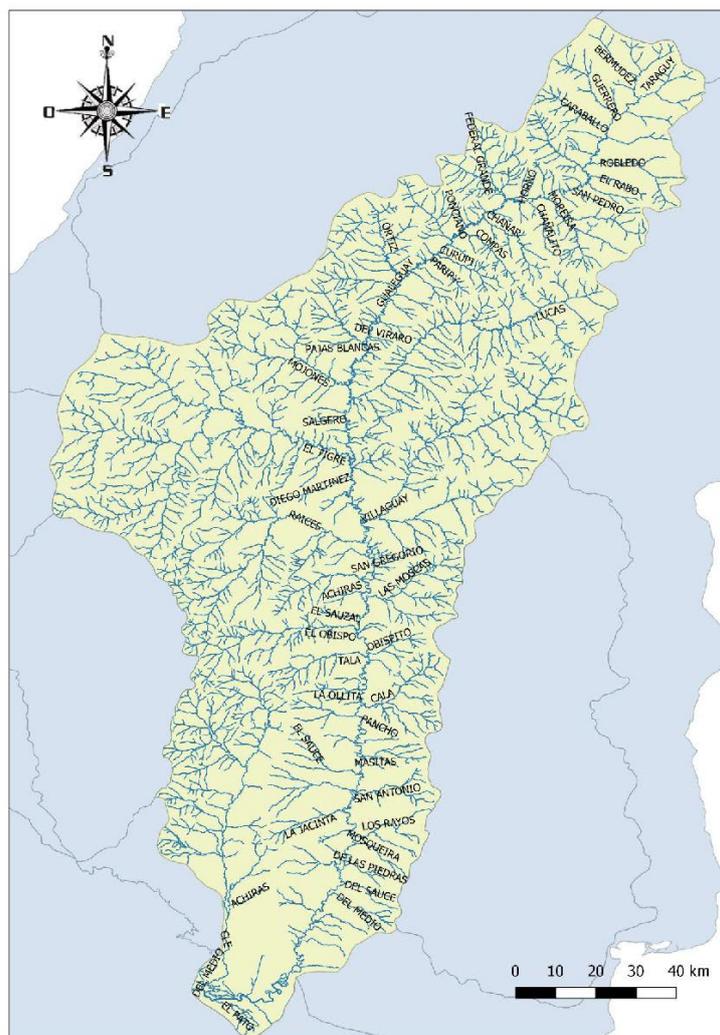


Figura 2.10. Cauces principales de la cuenca del río Gualeguay.

La estación de aforo de la cuenca del río Gualeguay se encuentra en la Ciudad de Rosario del Tala.

2.3.4. Cuenca del arroyo Nogoyá

En la Figura 2.11 a se observa la ubicación de la cuenca del arroyo Nogoyá en la Provincia de Entre Ríos. Esta cuenca se forma al sur de la lomada o cuchilla de Montiel, en el paraje llamado “Puntas del Nogoyá” y desemboca en el Riacho Victoria

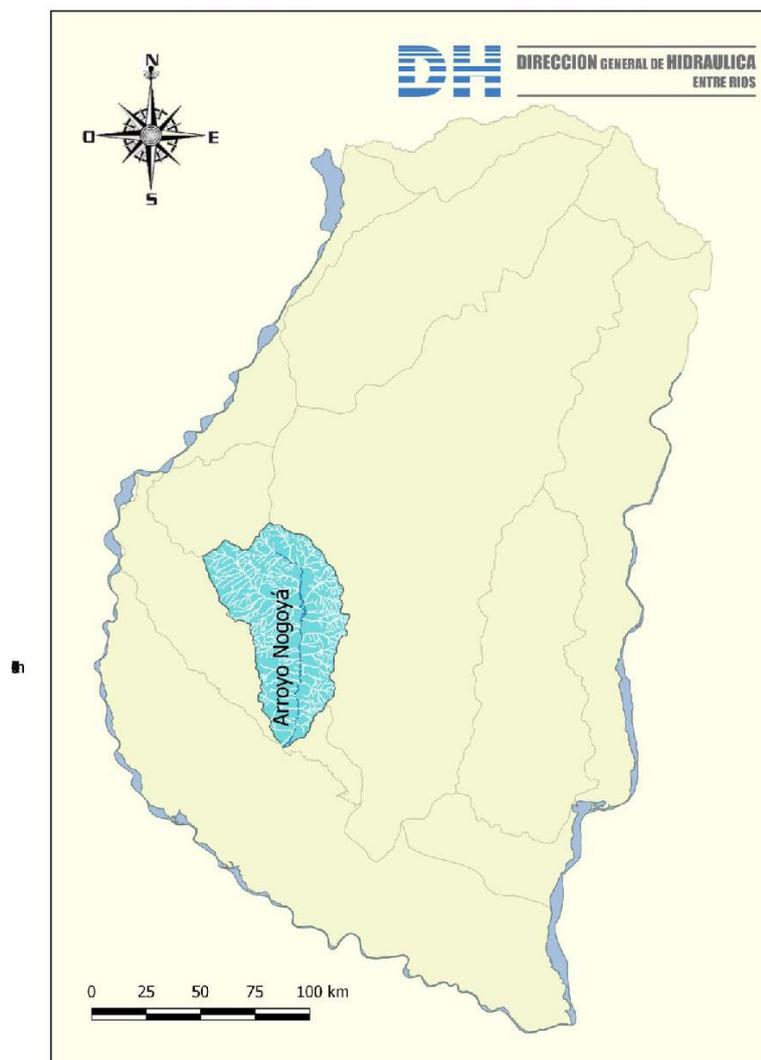


Figura 2.11. Ubicación de la cuenca del arroyo Nogoyá en la provincia.

El arroyo Nogoyá tiene sus nacientes en la parte norte de la cuenca, Esta zona se halla ubicada por encima de los 100 m sobre el nivel del mar. En cercanías de la ciudad de Nogoyá comienza la planicie de inundación del Aº Nogoyá, con una cota entre 30 y 35 m sobre el nivel del mar, con un ancho de unos 1.200 m. Por los tipos de suelos hay zonas con erosión moderada a severa. En la figura 2. 12

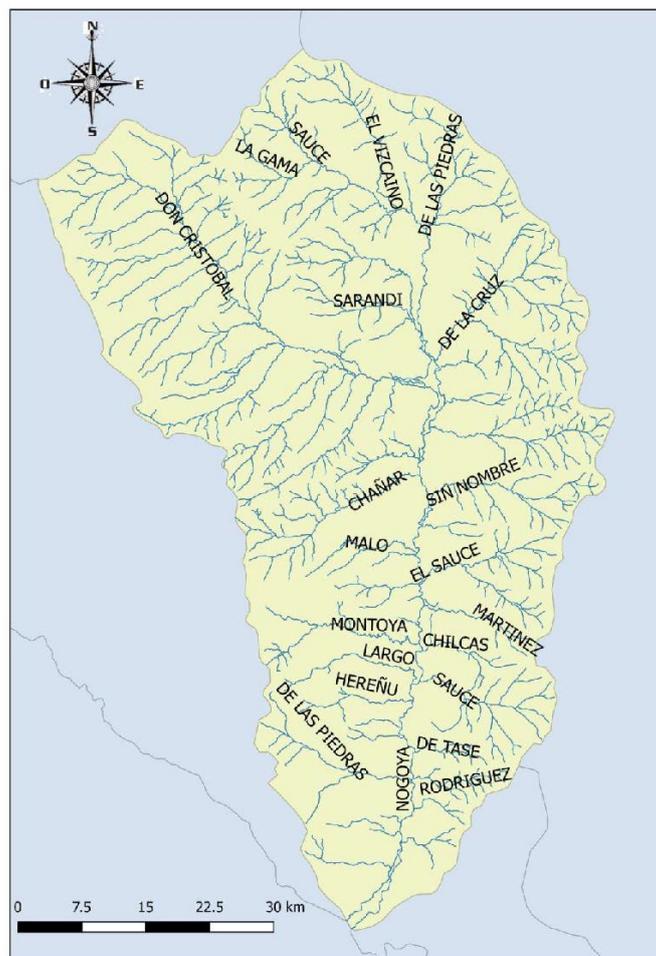


Figura 2.12. Afluentes principales del arroyo Nogoyá.

La estación de aforo de la cuenca del arroyo Nogoyá se encuentra en el cruce de la Ruta Provincial N° 11 y el arroyo Nogoyá.

2.3.5. Cuenca del Guayquiraró

La cuenca del río Guayquiraró forma parte de las provincias de Entre Ríos y Corrientes. Tiene un área aproximada de 1900 km² y desemboca en el río Paraná.

El río Guayquiraró se ubica al norte del territorio entrerriano, se clasifica como río de llanura y posee una longitud de 162 km. Sus afluentes principales, dentro de la provincia de Entre Ríos son arroyos de los departamentos de La Paz, Feliciano y Federación.

En la figura 2.13 se ilustra el “paso Juncué”, en donde se encuentra la estación del aforo de la cuenca del arroyo Guayquiraró.



Figura 2.13. Paso Juncué.

2.3.6. Cuenca del arroyo Yuqueri Grande

La cuenca del arroyo Yuqueri Grande tiene una superficie aproximada de 670 km² y está al Este de la Provincia de Entre Ríos. Se ubica en zonas de cuchillas por lo que se caracteriza por tener altillanuras con suelos arenosos con sedimentos arcillosos.

El arroyo Yuqueri Grande recorre el departamento Concordia de Oeste a Este desembocando en el río Uruguay en la ciudad de Concordia. Generalmente posee un pequeño caudal que se incrementa con las precipitaciones debido a que la zona cuenta con depresiones que desagotan en este arroyo. Además, recibe aporte de pequeños arroyos de la zona.

La estación de aforo de la cuenca del arroyo Yuqueri Grande se encuentra en la ciudad de Concordia.

3. Métodos utilizados

En este punto se detallan los fundamentos de los métodos y procedimientos utilizados en la investigación.

3.1. Aspectos hidrológicos

3.1.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrológica se puede definir como un área geográfica delimitada por líneas de mayor nivel denominadas divisorias de agua, donde se considera que en una precipitación se divide la escorrentía superficial, entre el agua que ingresa al sistema de la cuenca y la que queda fuera. Un sistema hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas (Chow et al., 1994).

Se definen entonces, una serie de parámetros utilizados para representar características de las cuencas, utilizados en el presente trabajo.

Área de la cuenca (A): la determinada por el contorno de las líneas divisorias de agua.

Perímetro (P): longitud del contorno de la cuenca.

Altura máxima, mínima y desnivel: la altura máxima se obtiene de la lectura de los planos de planialtimetrías, comparando las cotas y adoptando la de mayor altura dentro de la cuenca. La altura mínima se determina en correspondencia con la cota del cauce principal en la sección de control. El desnivel será entonces la diferencia entre la cota máxima y mínima.

Índice de compacidad o de Gravelius (Kc): es igual a la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área (ecuación 2.1.1), en otras palabras, es una relación que indica en qué medida la forma de la cuenca se aproxima a un círculo.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3.1.1)$$

Donde:

Kc: índice de compacidad.

P: perímetro de la cuenca.

A: área de la cuenca.

Índice de Pendiente: el gradiente de pendiente de una cuenca tiene incidencia en el tiempo de concentración de la cuenca, si bien la pendiente puede ser variable en los distintos puntos de la cuenca, este índice sintetiza la pendiente de la cuenca. Se define la pendiente media de la cuenca como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que se puede considerar constante la máxima pendiente. Para su determinación, intervienen las áreas comprendidas entre las curvas de nivel inmediatas, la longitud entre cada una de ellas y su equidistancia

Tiempo de Concentración (T_c): es el tiempo para el cual toda la cuenca comienza a contribuir, este es el tiempo de flujo desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Chow et al., 1994), en otras palabras, es el tiempo que una partícula de agua tarda en llegar del punto más alejado al punto de desagüe (Fattorelli & Fernández, 2011). Si bien existen muchas fórmulas empíricas para obtener una aproximación, en este trabajo se recurre a la fórmula desarrollada por Graf et al. (1982) a partir de estudios de cuencas del estado de Illinois (ecuación 3.1.2).

$$T_c = 1,54L^{0,875}S^{-0,181} \quad (3.1.2)$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración (horas).

L: longitud del flujo por el cauce principal desde la salida a la divisoria (millas).

S: pendiente del cauce principal determinada a partir de elevaciones en los puntos que representan 10 y 85% de la distancia a lo largo del canal, en pie/milla.

Coefficiente de Almacenamiento (R): es un coeficiente que tiene en cuenta el efecto de almacenamiento en la red de cauces de la cuenca. Nuevamente se recurre a la formula desarrollada por Graf (Graf et al., 1982) desarrollada a partir de estudios de cuencas realizadas en el estado de Illinois (ecuación 3.1.3).

$$R = 16,4L^{0,342}S^{-0,790} \quad (3.1.3)$$

Donde:

R: coeficiente de almacenamiento de Clark (horas).

L: longitud del flujo por el cauce principal desde la salida a la divisoria (millas).

S: pendiente del cauce principal determinada a partir de elevaciones en los puntos que representan 10 y 85% de la distancia a lo largo del canal, en pie/milla.

Coefficiente Lamda (λ): coeficiente que relaciona los parámetros del hidrograma unitario de Clark, T_c y R. Se calcula mediante la ecuación 2.1.4.

$$\lambda = \frac{R}{T_c + R} \quad (3.1.4)$$

Donde:

R: coeficiente de almacenamiento de Clark (horas).

T_c : tiempo de concentración (horas).

Longitud de cauce principal: se determina por medición directa de la longitud del cauce más importante de cada cuenca. En la elección de dicho cauce, se tiene en cuenta en cada caso, tanto la longitud de este, como su desnivel, buscando siempre el curso que presenta en lo posible, el máximo para ambos valores (Fattorelli & Fernández, 2011).

Pendiente media del cauce principal: se calcula directamente por la media aritmética, considerando las elevaciones extremas del cauce principal (Fattorelli & Fernández, 2011).

Curva Número (CN): es el método que relaciona la precipitación total de la tormenta con la precipitación efectiva. El mismo se determina a través de un estudio hidrológico del suelo y de la vegetación existente en la cuenca. Se clasifica al suelo en cuatro grupos según su potencial de escurrimiento, desde la A la D, según sea mínimo o máximo respectivamente. Se tiene en cuenta los factores de pendiente, permeabilidad del suelo y demás características del suelo. A partir de ello, se realiza una clasificación según el uso del suelo, esta clasificación se enfoca en el tipo de vegetación existente, el tipo de uso del suelo; para lo cual se determinan las zonas de diferentes tipos de cultivos, labranzas, bosques, cursos de agua y/o la densidad de las áreas urbanas. Existen diversas sugerencias de autores acerca del valor de CN a utilizar, teniendo en cuenta el potencial de escurrimiento y el uso del suelo. A partir del CN determinado en el campo, podemos correlacionar mediante fórmulas empíricas para obtener el valor de CN para diferentes condiciones de humedad, como las de suelo seco (CN I) y suelo en saturación (CN III)

3.1.2. Precipitaciones

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca.

Para el diseño hidrológico, los datos que se deben tener en cuenta son la lámina, la intensidad y la duración de la lluvia. A partir de estos datos, se pueden construir diagramas como el hietograma que considera la distribución en tiempo de la lluvia, o gráficos como la curva de masa de lluvia.

Entre los datos mencionados se definen:

Lámina: el total de lluvia caída en un determinado tiempo en un punto o sobre un área, se expresa en milímetros;

Duración: como el período de tiempo en el cual llueve;

Intensidad: se define como la tasa de precipitación caída en un intervalo de tiempo, expresada generalmente en mm/hora, esta relación indica los efectos de las lluvias, es decir, una lluvia con poca intensidad no tendrá los mismos efectos que una de gran intensidad, la de gran intensidad puede

provocar inundaciones, colapsar sistemas de drenaje, provocar destrozos en zonas costeras a cursos de agua, etc.

Para representar la distribución temporal de las lluvias se recurre al hietograma y a la curva de masa, el primero, es un gráfico de lámina o intensidad de lluvia en función del tiempo que se aplica, en el diseño hidrológico, a tormentas individuales; el segundo, es un gráfico de lámina de lluvia acumulada durante un determinado tiempo (Fattorelli & Fernández, 2011).

También, es de interés para el diseño hidrológico conocer la distribución espacial de las precipitaciones. Se entiende por precipitación media a la lámina media caída sobre un área dada, es decir, se asume a cada punto de un área influenciada un valor igual de precipitación correspondiente con la media en esa área.

3.1.2.1. Distribución Temporal de Tormentas

A continuación, se describen los dos métodos utilizados:

3.1.2.1.1. Bloques Alternos

El método de los bloques alternos es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad- duración- recurrencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica las láminas de precipitación que ocurren en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de:

$$T_d = n \cdot \Delta t$$

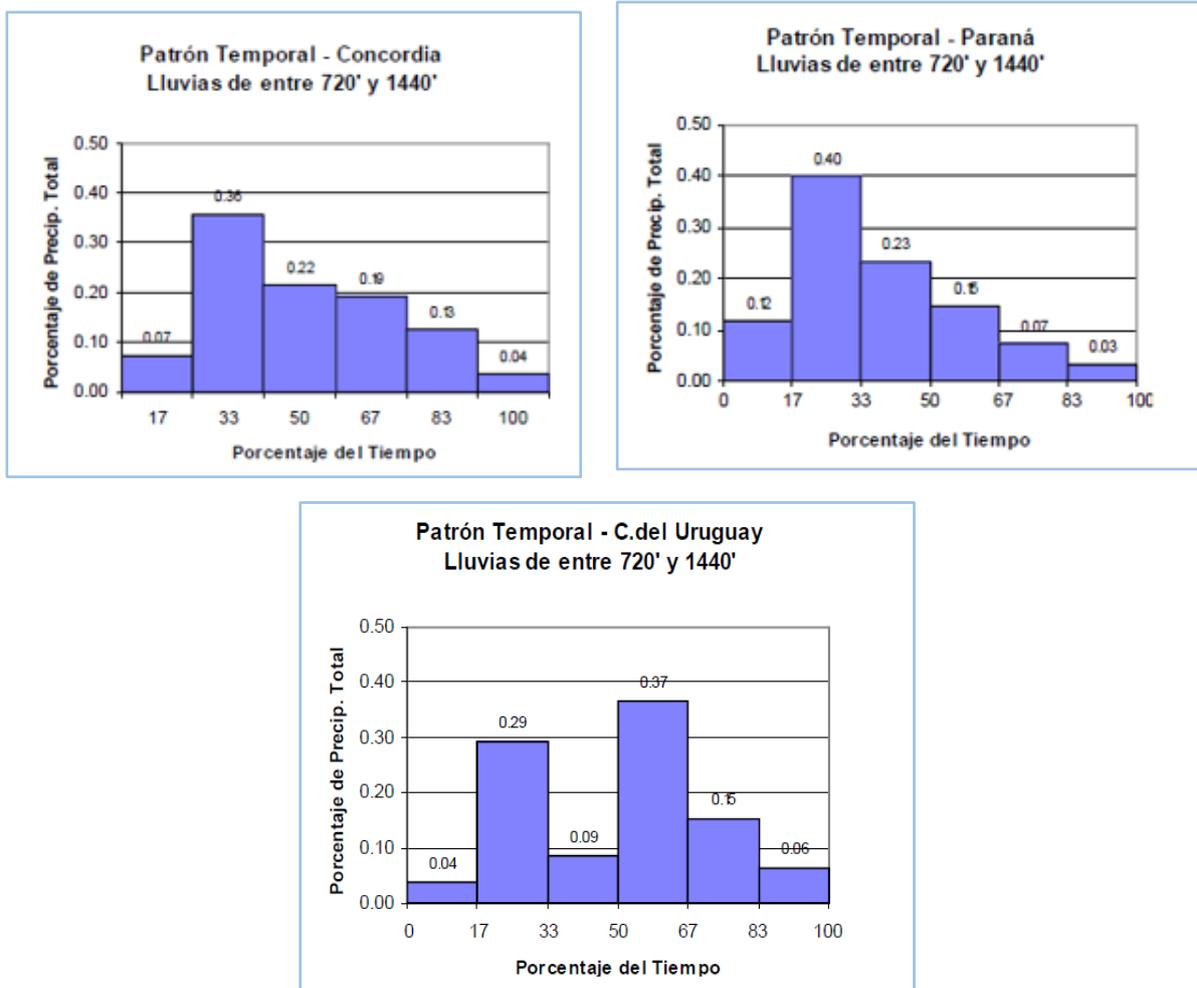
En primer lugar, debe definirse el período de retorno de diseño; posteriormente la intensidad se calcula con una curva I-D-T para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, $n\Delta t$.

Obteniéndose la lámina de precipitación multiplicando la intensidad y su duración. Se toman diferencias entre valores sucesivos de lámina de precipitación, con lo cual se determinan la cantidad de precipitación por unidad de tiempo Δt (bloques de precipitación). Estos bloques se reordenan en una secuencia temporal, de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de

la duración total T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y a la izquierda del bloque central, para formar el hietograma de diseño.

3.1.2.1.2. Patrones Temporales (Zamanillo et al., 2008).

Este método se basa en el análisis de tormentas intensas locales en base al cual se definieron patrones temporales para distintas duraciones en las localidades de Paraná, Concordia y Concepción del Uruguay. La duración total de la tormenta fue dividida en cuantiles variables, de acuerdo con su rango. De esta forma, las duraciones mayores a 120 minutos fueron divididas en 6 cuantiles, mientras que para las tormentas de corta duración se adoptaron los siguientes cuantiles: tres para duraciones menores o iguales a 30 minutos, cuatro para duraciones entre 30 y 60 minutos y cinco para duraciones variables entre 60 y 120 minutos (Figura 3.1)



Figuras 3.1. Patrones Temporales.

3.1.2.2. Distribución Areal de la precipitación

En el caso de una cuenca de área reducida, se puede estimar a la precipitación como constante en toda su área, es decir, la tormenta de diseño puede ser estimada a partir de la información de una única estación de medición pluviométrica.

Cuando la cuenca es de gran tamaño, esta consideración ya no es aplicable, es decir la distribución de la precipitación ya no es constante en toda su área. Para lograr que una serie puntal de valores de precipitación sea representativa en el área de trabajo, se emplean curvas de abatimiento areal de la precipitación. Estas curvas representan la lámina de precipitación promedio sobre un área como porcentaje de valores de precipitación puntal correspondiente al núcleo de la tormenta.

Las relaciones lámina-área para diferentes duraciones se deducen de un análisis de precipitación – área – duraciones, en el cual se preparan mapas de isohietas para cada duración utilizando lluvias máximas registradas en un área densamente instrumentada, teniendo en consideración que la ubicación de las estaciones pluviométricas debe ser representativas de la región en estudio y además contar con una serie extensa de información, permitiendo seleccionar los eventos críticos del conjunto (Zimmermann, 2000).

Actualmente es usual utilizar las curvas de la Organización Meteorológica Mundial, desarrolladas en Estados Unidos en el año 1958. Estas curvas fueron desarrolladas para áreas menores a 600 km², teniendo un comportamiento constante para superficies mayores. Pero siempre que se tengan estudios realizados con precipitaciones de la zona es conveniente utilizar curvas generadas con datos del sitio de estudio.

3.1.3. Modelación hidrológica

Un modelo hidrológico es una aproximación al sistema real, sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conecta estas variables (Chow et al., 1994).

En otras palabras, un modelo hidrológico es una simulación de la realidad, de los procesos y eventos hidrológicos que suceden y transcurren en un determinado espacio, en este caso una cuenca. Desde sus inicios los modelos desempeñan un papel importante en muchas áreas de la hidrología.

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centers Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica por eventos, lineal y semi-distribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas a partir de condiciones de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa (US Army Corps of Engineers/Hydrologic Engineering Center). En distintas instancias de la investigación se utilizó este software de modelación, como se detallará en las secciones siguientes.

3.1.4. Regionalización de Cuencas

El propósito principal de la regionalización hidrológica es la transferencia de información de las cuencas aforadas a las no aforadas, de una misma región (Franchini & Suppo, 1996; Tucci Morelli, 2007). Esta discretización espacial se realiza frecuentemente teniendo en cuenta las características geomorfológicas y climáticas —que definen la respuesta hidrológica de la región— y puede resultar incluso en zonas sin continuidad geográfica, aunque su comportamiento hidrológico sea semejante (de Andrade & Hawkins, 2000).

Así es como Clarke y Brusa (Clarke & Brusa, 2002), proponen el uso de técnicas de regionalización para estimar el caudal medio anual en cuencas no aforadas basado en una ecuación de regresión múltiple a partir de datos en estaciones cercanas. Los autores encontraron que, de las principales variables que intervienen en dichas relaciones, el área es la más importante. Loebis (Loebis & Agung Bagjawan I., 2002), usan los Sistemas de Información Geográfica para estimar el escurrimiento en diversas cuencas, a partir de datos de precipitación y de la topografía.

El uso de métodos estadísticos multivariados como Análisis de Componentes Principales (ACP) ha sido empleado para la definición de

regiones homogéneas, tal como lo demuestran numerosos autores. Mallants y Feyen (Mallants & Feyen, 1990), investigan el patrón de distribución espacial de la precipitación sobre la cuenca de IJzer en el este de Bélgica y norte de Francia, usando la precipitación diaria. Mediante ACP y curvas de Andrews, Álvarez Olguín et al. (Álvarez Olguín et al., 2011) identificaron 17 subcuencas para las que cuantificaron 20 variables climáticas y fisiográficas potencialmente útiles en la predicción de caudales.

De igual manera, Chiang (Chiang et al., 2002) proponen un esquema de regionalización hidrológica en cuencas aforadas, utilizando el Análisis de Agrupamiento (Clustering) para clasificar 94 subcuencas en 6 regiones homogéneas. El estudio se hizo para cuencas de Alabama, Georgia y Mississippi (Estados Unidos), con resultados satisfactorios.

Paris y Zucarelli (M. del C. Paris & Zucarelli, 2004) destacan la importancia de la utilización conjunta de varios métodos estadísticos-matemáticos y su evaluación integrada con la caracterización conceptual del sistema para identificar regiones homogéneas en forma consistente. Utilizan para ello el agrupamiento en modo Q para lograr una primera aproximación en la clasificación del conjunto de datos y evaluación de sus similitudes; Análisis de Componentes Principales en el modo R como metodología complementaria en la definición de los grupos homogéneos a través de las marcas y posteriormente las curvas de Andrews para establecer el orden más adecuado de las variables involucradas.

3.2. Aspectos estadísticos

3.2.1. Análisis de Frecuencias

Un análisis de frecuencias permite conocer la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento, y la herramienta que ofrece la estadística para llevarlo a cabo son las funciones de distribución de probabilidad. Con ellas se puede dar a una variable aleatoria X una posibilidad de ocurrencia dentro de un rango de valores, o al menos un valor tope o base. Existen numerosos estudios, y en ellos funciones que han sido determinadas para llevar a cabo este análisis,

por lo que a continuación se describen los que se han empleado en este estudio.

Distribución LOG – NORMAL

La función propuesta por Galton en 1879 surge de aplicar una función exponencial a una variable que posee una distribución normal. Por lo que también se puede decir que teniendo una variable X que sigue la distribución log-normal, al trabajarla como $\log X$ se tendrá una distribución normal. La función log-normal responde a la siguiente ecuación 3.1. Una ventaja de esta función es que, debido a las propiedades del logaritmo, se limita solo a valores positivos, además de que reduce la asimetría de la curva.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (3.1)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

y : variable aleatoria. $y = \log(x)$.

σ : desviación estándar de x .

μ_y : media de y .

σ_y^2 : varianza de y .

Distribución de GUMBEL

Se corresponde con una de las funciones de distribución de valores extremos, en particular, la de tipo I desarrollada por Gumbel (Gumbel, 1941). Como las demás de este tipo, se basa en el análisis de una serie de valores extremos, máximos o mínimos, de la variable en estudio. Está dada por la ecuación 3.2.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)} - e^{\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)} \quad (3.2)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

α, u : parámetros del método.

Distribución GENERAL DE VALORES EXTREMOS (GEV)

Al igual que la anterior trabaja con series de valores extremos, pero se corresponde con una función general que abarca los tres tipos que se habían definido previamente (Jenkinson, 1955). La función está dada por la ecuación 3.3.

$$f(x) = e^{\left(-\left(1-\frac{x-u}{\alpha}\right)^{1/k}\right)} \quad (3.3)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

k, α, u : parámetros del método.

Distribución PEARSON III

Se desarrolló en base a la función de distribución gamma y cuenta con tres parámetros: λ, β y ϵ que se obtienen en función de la desviación estándar, la media y el coeficiente de asimetría (Chow et al., 1994). La función se describe a través de la expresión 3.4.

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x-\epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)} \quad (3.4)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

y : variable aleatoria. $y = \log x$.

λ, β, ϵ : parámetros del método.

$\Gamma(\beta)$: función gamma (Abramowitz & Stegun, 1972)

Distribución LOG – PEARSON III

Al igual que en la distribución normal, se utiliza el logaritmo para ajustar la curva original. Por lo que para una variable X con distribución Log - Pearson III, la variable $\log X$ tendrá una distribución Pearson III. Depende de los mismos tres parámetros (λ , β y ϵ), pero en este caso dependen del logaritmo de las características de la muestra. Su ecuación es la 3.5.

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (y-\epsilon)^{\beta-1} e^{-\lambda(y-\epsilon)}}{x \Gamma(\beta)} \quad (3.5)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

y : variable aleatoria. $y = \log x$.

λ , β y ϵ : parámetros del método.

$\Gamma(\beta)$: función gamma (Abramowitz & Stegun, 1972).

Distribución EXPONENCIAL

La función se encuentra definida para representar el tiempo en procesos de Poisson (procesos instantáneos, simultáneos e independientes) al producirse la interacción entre los eventos. Se encuentra en función de un único parámetro λ que se obtiene a partir de la muestra. La función está dada por la ecuación 3.6.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (3.6)$$

Donde:

x : variable aleatoria.

λ : parámetro de la función.

Distribución WAKEBY

La función fue desarrollada en la década del 1970 por Houghton (Houghton, 1977, 1978a, 1978b) y se define como la inversa de su función de distribución acumulada. Una característica que le confiere flexibilidad para ser utilizada en diversos casos es que se encuentra en función de cinco parámetros. Su ecuación es la 3.7.

$$x = m + a \left[1 - (1 - f(x))^b \right] - c \left[1 - (1 - f(x))^{-d} \right] \quad (3.7)$$

Donde:

x: variable aleatoria.

f(x): función de distribución.

m, a, b, c, d: parámetros de la función.

3.2.2. Análisis Estadístico Multivariado

Los métodos estadísticos adquieren gran importancia en el manejo de datos hidrológicos debido fundamentalmente a su capacidad de optimización y síntesis en la generación de información. Además, al considerar numerosas variables, el problema en estudio presenta una múltiple referenciación y se conforman bases de datos de gran tamaño. Esta situación implica la necesidad de adoptar un enfoque multivariado para el procesamiento y análisis, ya que, de lo contrario, sólo se realizaría la interpretación circunscripta e independiente de cada una de estas variables (M. Paris, 2010).

3.2.2.1. Análisis de Correlación

Tiene por finalidad visualizar si existe alguna relación entre dos o más variables, es decir, si los cambios en una o varias de ellas influyen en los valores de la variable dependiente. Si ocurre esto decimos que las variables están correlacionadas o bien que hay correlación entre ellas (Montgomery et al., 2006).

El análisis del coeficiente de correlación de Pearson adopta valores comprendidos entre -1 a 1 , indicando que aquellos valores cercanos a la unidad

indican una fuerte asociación lineal entre las variables analizadas. En cambio, aquellos valores próximos a cero, carecen de algún tipo de asociación.

Este análisis puede ser acompañado por un gráfico de dispersión, para visualizar la elación entre las variables en estudio.,

3.2.2.2. Análisis de Componentes Principales

El análisis de componentes principales (PCA) permite simplificar la complejidad y visualizar la información más importante que contiene un conjunto de datos multivariado. Se logra reducir la dimensión del conjunto de datos, mejorando su interpretación al mismo tiempo que se reduce la pérdida de información.

Previamente a realizar el PCA, deben estandarizarse todos los datos, es decir que todas las variables deben tener media 0 y desviación estándar 1, debido a que explica la variabilidad total del modelo. La importancia de la estandarización de todas las variables radica que, si no se realiza, las variables que presenten un mayor error estándar dominarán al resto. De ahí surge la necesidad de estandarizar los datos de las variables en estudio.

Se determina la combinación lineal entre las variables en estudio y se identifica las componentes que mejor describen esta combinación. Luego, se procede a realizar la interpretación gráfica y a la extracción de las conclusiones con respecto a la variable de interés, caudal.

3.2.2.3. Agrupamiento de Conglomerados - Clustering

El análisis de agrupamiento por conglomerados es una técnica estadística multivariante que busca agrupar individuos o variables, a través de diferentes métodos o algoritmos, tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos.

A partir de una tabla de individuos-variables, trata de ubicar las variables o los individuos en grupos homogéneos, conglomerados o también denominados clusters, no conocidos de antemano, pero sugeridos por la propia esencia de los datos, de manera que los individuos que puedan ser

considerados similares sean asignados a un mismo cluster, mientras que individuos diferentes se localicen en clusters distintos.

La variedad de formas de medir diferencias multivariantes o distancias entre casos proporciona diversas posibilidades de análisis. El empleo de ellas, y el de las que continuamente siguen apareciendo, así como de los algoritmos de clasificación, o diferentes reglas matemáticas para asignar los individuos a distintos grupos, depende del fenómeno estudiado y del conocimiento previo de posible agrupamiento que de él se tenga.

Para poder unir variables o individuos es necesario tener medidas numéricas que caractericen las relaciones entre las variables o los individuos, es decir, debe elegirse una **distancia** como medida de asociación.

En este estudio se han utilizado dos medidas de distancias, la **Distancia Euclidiana** y la **Distancia de Minkowski**, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Distancia Euclídea: } d(x_i x_j) = \sqrt{\sum_{c=1}^p (x_{ic} - x_{jc})^2}$$

$$\text{Distancia Euclídea: } d_q(x_i x_j) = \left(\sum_{c=1}^p |x_{ic} - x_{jc}|^q \right)^{\frac{1}{q}} \text{ donde } q \geq 1$$

A su vez, existen dos tipos de clustering, jerárquicos y no jerárquicos, en este análisis se han utilizado cuatro métodos de clustering del tipo jerárquico, los cuales consisten en clasificar los datos en grupos con estructura arborescente de dependencia, de acuerdo con diferentes niveles de jerarquía.

Partiendo de grupos iniciales como de individuos que surgen del análisis en estudio, se trata de conseguir agrupaciones sucesivas entre ellos de forma que progresivamente se vayan integrando en clusters que, a su vez, se unirán entre sí en un nivel superior formando grupos mayores que posteriormente se juntarán hasta llegar al cluster final que contiene todos los casos analizados. La representación gráfica de estas etapas de formación de grupos, a modo de

árbol invertido, se denomina **dendrograma** (Figura 3.2). Dependiendo de la altura de corte que se elija, se lo puede dividir en tantos grupos o clusters como sea necesario para el estudio de interés.

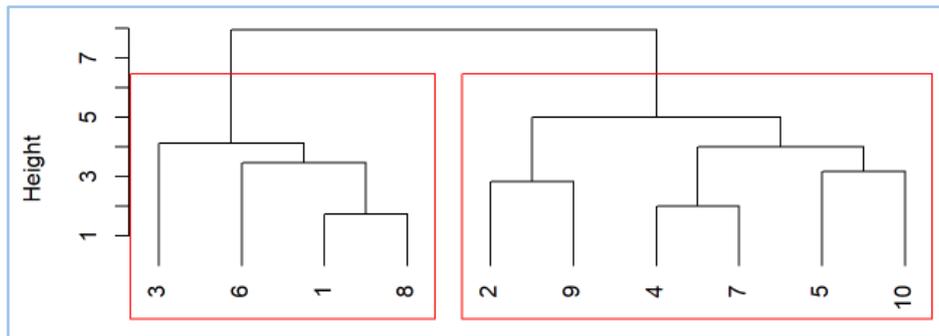


Figura 3.2 Modelo de Dendrograma.

Los cuatro métodos utilizados fueron los siguientes:

- **Método de Ward o de mínima varianza**
El método de Ward une los casos buscando minimizar la varianza dentro de cada grupo (Ward, 1963).
- **Método Simple o de distancias mínimas**
Agrupa a los casos que se encuentran a menor distancia. Unidos dos casos, a continuación, se forma el tercer conglomerado buscando la distancia más corta entre los tres elementos.
- **Método del Centroide**
La distancia entre dos grupos es la distancia existente entre sus centros de gravedad. El proceso comienza calculando el centro de gravedad de cada conglomerado, para agrupar los conglomerados cuya distancia entre centroides sea mínima. Tras unir dos conglomerados se calcula el nuevo centro de gravedad y se procede de forma similar.
- **Método Completo o de distancias máximas**
Es similar al método simple, aunque este procede a unir los casos que se encuentran a mayor distancia, siendo un método más restrictivo que el simple.

3.2.2.4. Curva de Andrews

Andrews (Andrews, 1972) propuso un método simple y útil para representar gráficamente datos multidimensionales en solo dos dimensiones, para cada subcuenca o punto de observación es posible definir una función armónica en donde los coeficientes que afectan a las funciones seno y coseno, y el término constante son definidos por los valores cuantificados para las n variables. Esto deriva en una expresión como la siguiente:

$$f(x) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \text{sen}(t) + X_3 \text{cos}(t) + X_4 \text{sen}(2t) + X_5 \text{cos}(2t) + \dots$$

Donde:

X_1, X_2, \dots, X_n : son las variables fisiográficas de la subcuenca

t : representa en el rango entre -2π y 2π .

Por otra parte, la preparación de los datos es muy importante antes de graficar las Curvas de Andrews, esto implica el pretratamiento o transformación de los datos en función de su normalidad, escalas, unidades y orden de magnitud de cada variable, las cuales naturalmente son diferentes.

La solución para esto es trabajar con el logaritmo natural de los datos para corregir su asimetría por no ajuste a la distribución estadística normal, lo que se denomina estandarización o normalización de estos.

Una variable está estandarizada cuando a cada uno de sus valores se le resta su media aritmética (\bar{x}) y se lo divide por la desviación estándar (σ):

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

El resultado de realizar esta operación con cada una de las variables es que la media de cada una de las variables es 0 y su desviación estándar 1. De esta manera se solucionan los problemas de escalas y unidades. Esta herramienta es muy utilizada en el análisis de datos de múltiples variables.

Una vez estandarizadas las variables, es posible obtener un gráfico de las llamadas Curvas de Andrews, como el que se presenta en la **Figura 3.3**. Este gráfico permite identificar las semejanzas en el comportamiento hidrológico de acuerdo con la similitud morfológica de estas funciones.

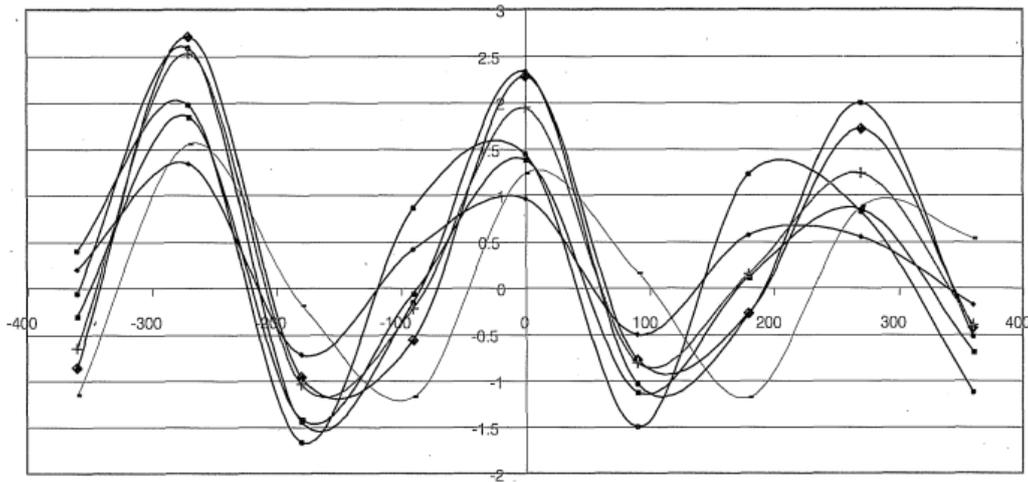


Figura 3.3 Curvas de Andrews

3.2.2.5. Regresión Lineal Múltiple

La regresión lineal múltiple permite generar un modelo lineal en el que el valor de la variable dependiente (\hat{Y}) o respuesta se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores ($X_1, X_2, X_3\dots$).

Los modelos lineales múltiples siguen la siguiente ecuación:

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}) + e_i$$

Donde β_0 es la ordenada al origen, el valor de la variable dependiente cuando todos los predictores son cero. β_1 es el efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora X_i , manteniéndose constantes el resto de las variables, se conocen como coeficientes parciales de regresión. e_i es el residuo o error, la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo de regresión (Montgomery et al., 2006).

3.2.2.6. Índice de Creciente

El Método del Índice de Crecientes o de Avenidas (Dalrymple, 1960) establece un procedimiento formal de la Exploración Geológica

Estadounidense (U.S. Geological Survey), en el cual una región hidrológica está integrada por estaciones hidrométricas cuyo comportamiento de frecuencia de crecientes es homogéneo y en alguna forma cuantificable.

El análisis regional explota esta homogeneidad, a través de la Ecuación Regional de Frecuencia, con el fin de producir estimaciones confiables.

La determinación de la Ecuación Regional de Frecuencia (Figura 3.4) consiste en calcular la media aritmética de las relaciones de caudales de los distintos periodos de retorno en los cuales se tenga información y trazar su línea de tendencia. La función de la línea de tendencia permite obtener un Índice de Creciente para la recurrencia que se desee.

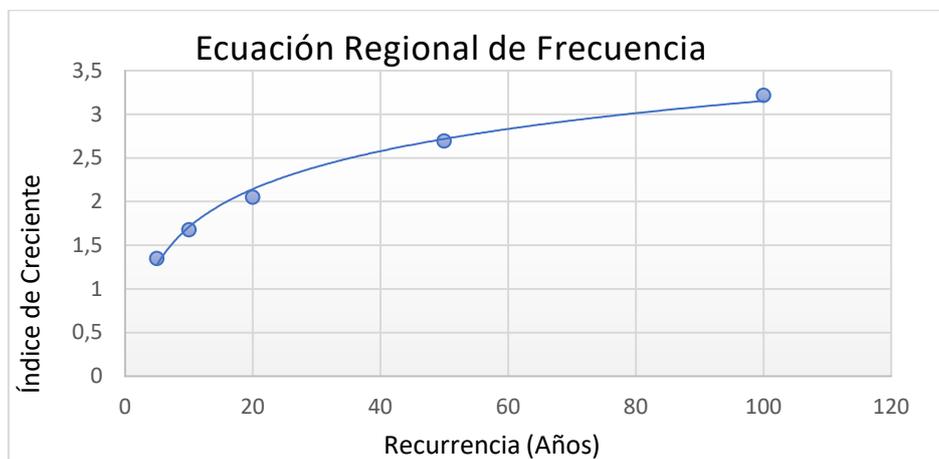


Figura 3.4. Ecuación Regional.

4. Cuenca del arroyo Feliciano

4.1. Recopilación de datos y análisis

En primer lugar, se extrajeron los registros de la Red Hidrológica Nacional en la estación de aforo "Paso Medina" (Figura 4.1), los datos recopilados se refieren tanto a caudales máximos medios diarios como a máximos instantáneos.

Se seleccionó el mayor valor registrado dentro de cada año hidrológico, el cual comienza en octubre, con la temporada de mayores precipitaciones y finaliza en septiembre del siguiente año, desde el año 1975 hasta el año 2017.

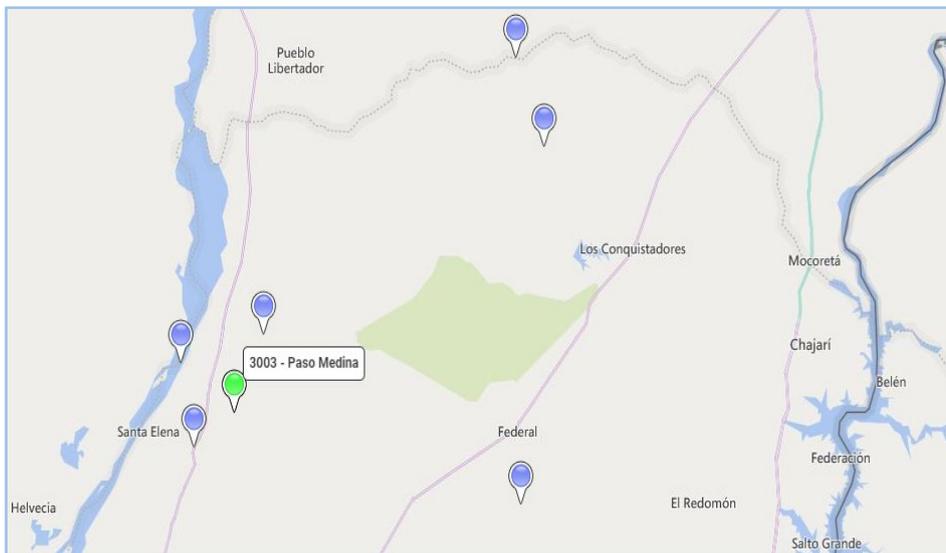


Figura 4.1. Estaciones de aforo – Red Hidrológica Nacional.

Criterio de selección de los puntos aforados

Se descartaron aquellos valores correspondientes a años cuyos registros fueron alterados significativamente debido a la ausencia de datos en varios meses, sobre todo en los casos de las series temporales en las que no se registraron mediciones en meses de verano, los cuales son altamente representativos en el régimen natural. Es por este motivo que algunos años fueron considerados como "Sin Datos".

A continuación, se muestra la tabla (Tabla 4.1) de valores utilizada para realizar el análisis de frecuencia con los valores de caudales en metros cúbicos por segundo:

Tabla 4.1. Caudales Instantáneos Máximos Anuales.

Año Hidrológico	Caudal Instantáneo Máximo Anual (m ³ /s)	Año Hidrológico	Caudal Instantáneo Máximo Anual (m ³ /s)
1975	806,5	1997	2.248,40
1976	Sin Datos	1998	520,7
1977	Sin Datos	1999	245,4
1978	Sin Datos	2000	665,2
1979	292,3	2001	735,8
1980	340,9	2002	2.254,10
1981	108,1	2003	195,7
1982	326,5	2004	2.373,90
1983	Sin Datos	2005	660,1
1984	481,7	2006	671
1985	845,5	2007	166,9
1986	376,7	2008	367,9
1987	1.934,40	2009	1.575,90
1988	446,7	2010	Sin Datos
1989	721,5	2011	665,3
1990	331,6	2012	851,8
1991	716,9	2013	798
1992	557,1	2014	745,5
1993	641	2015	2.243,60
1994	223,5	2016	458,9
1995	925,3	2017	1.529,90
1996	131,2		

Una vez obtenida la serie de datos, se utilizó el programa AFMulti para realizar el análisis de frecuencia de caudales.

Este programa permite estimar parámetros de funciones de distribución probabilística, a partir de las cuales es posible estimar eventos para distintos

períodos de retorno. En este caso se determinaron valores de la variable para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

De las distintas funciones de distribución y procedimientos de estimación de parámetros disponibles en la bibliografía y de acuerdo con modernos criterios fueron seleccionadas siete distribuciones con un método de ajuste particular para cada una.

Estos procedimientos de estimación se realizan a partir de las siguientes distribuciones:

- Log Gauss – Normal (2p) (LN2) - Método de Ajuste de Parámetros
- Gumbel (GU) - Método Ponderados por Probabilidad
- General de Valores Extremos (GEV) - Momentos Ponderados por Probabilidad
- Pearson III (PIII) - Máxima Verosimilitud
- Exponencial (EXP) - Momentos Método Tradicional
- Wakeby (WA) - Momentos Ponderados por Probabilidad

Posteriormente se cuantificaron los errores existentes entre los datos observados y dichas distribuciones de ajuste. Para cada modelo o función de distribución se calcularon las medias de los errores absolutos de todas las estaciones existentes en la región (MAE) y se calcularon los errores cuadráticos medios de frecuencia (ECMF) y variable (ECMV) para cada una de las distribuciones.

En la **Figura 4.2** se puede observar el análisis estadístico mencionado. En el eje de abscisas puede observarse la recurrencia o periodo de retorno en años y en las ordenadas el valor del caudal en metros cúbicos por segundo.

En primera instancia se descartaron las distribuciones de GEV y Gumbel ya que visualmente se notó su poca capacidad de ajuste a los datos reales. Quedando las otras 4 a analizar en comparación con los caudales medidos en el modelo hidrológico.

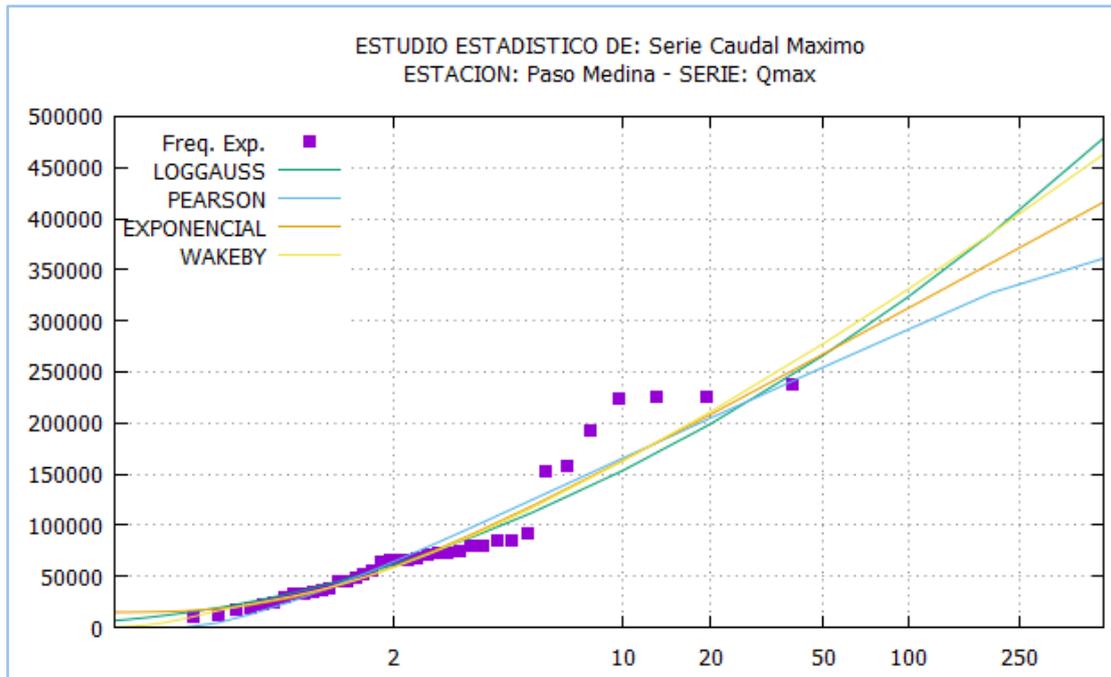


Figura 4.2. Análisis de Frecuencia – Serie de Caudales Máximos.

En la Figura 4.3 se puede observar el estudio de los errores a través del error cuadrático de media frecuencia (ECMF) y el error cuadrático de media variable (ECMV).

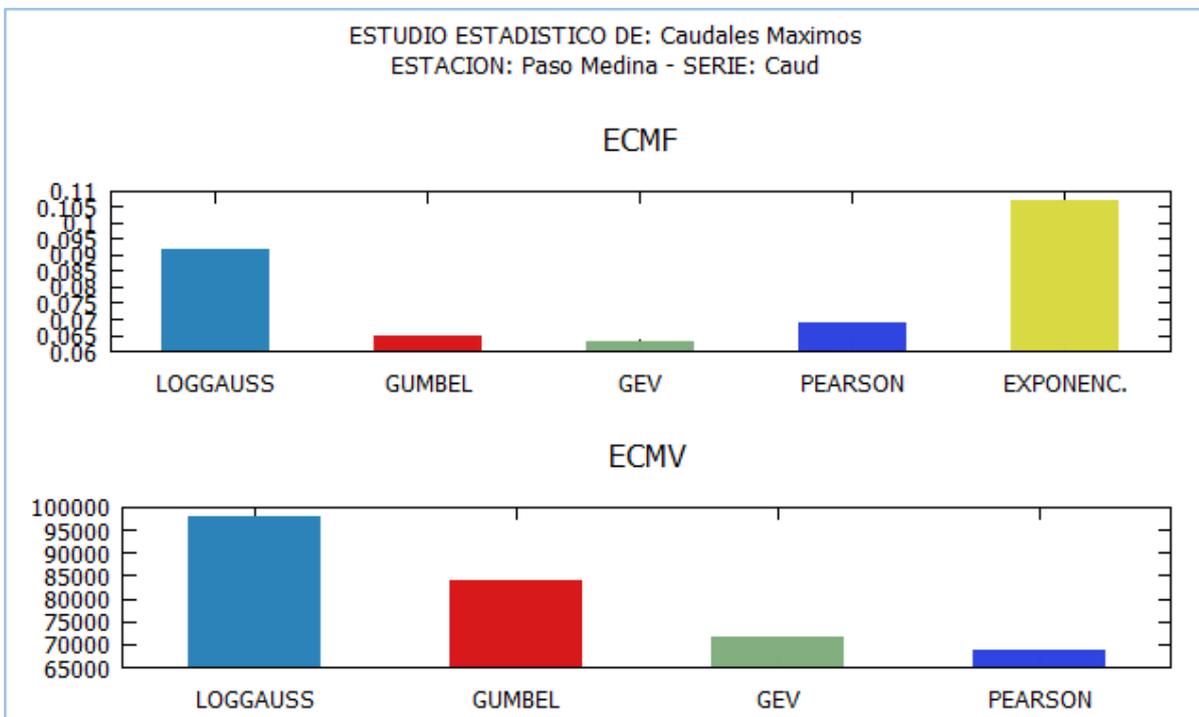


Figura 4.3. Errores ECMF y ECMV.

En la **Tabla 4.2** pueden observarse los resultados de caudales estimados por cada una de las distribuciones de ajuste evaluadas, correspondiente a la probabilidad de que suceda, la cual es inversa a la recurrencia.

Tabla 4.2. Valor del Caudal por Distribución de Ajuste.

Probabilidad	Recurrencia (Años)	Log Gauss	Pearson	Wakeby	Exponencial
0,01	100	3.231,30	2.913,30	3.306,10	3.121,80
0,02	50	2.661,00	2.545,50	2.775,60	2.674,30
0,05	20	1.988,70	2.047,20	2.108,50	2.082,70
0,1	10	1.535,30	1.656,80	1.628,40	1.635,20
0,2	5	1.122,40	1.247,80	1.168,50	1.187,70
0,5	2	616,3	647	596,1	590

4.2. Cálculo de Hietogramas

Para el cálculo de las intensidades se trabajó directamente con la variable más importante en el proceso de transformación lluvia-caudal, la precipitación media areal sobre la cuenca (Caamaño Nelli et al., 2012). Esta vía directa evita la utilización de coeficientes de ajuste que generan gran incertidumbre en los resultados (Tucci Morelli, 2007). De esta manera se utilizaron las curvas Intensidad – Duración - Recurrencia (**Figura 4.4**) del proyecto de investigación antecedente con cierre en la Estación Paso Medina (Lopez et al., 2020).

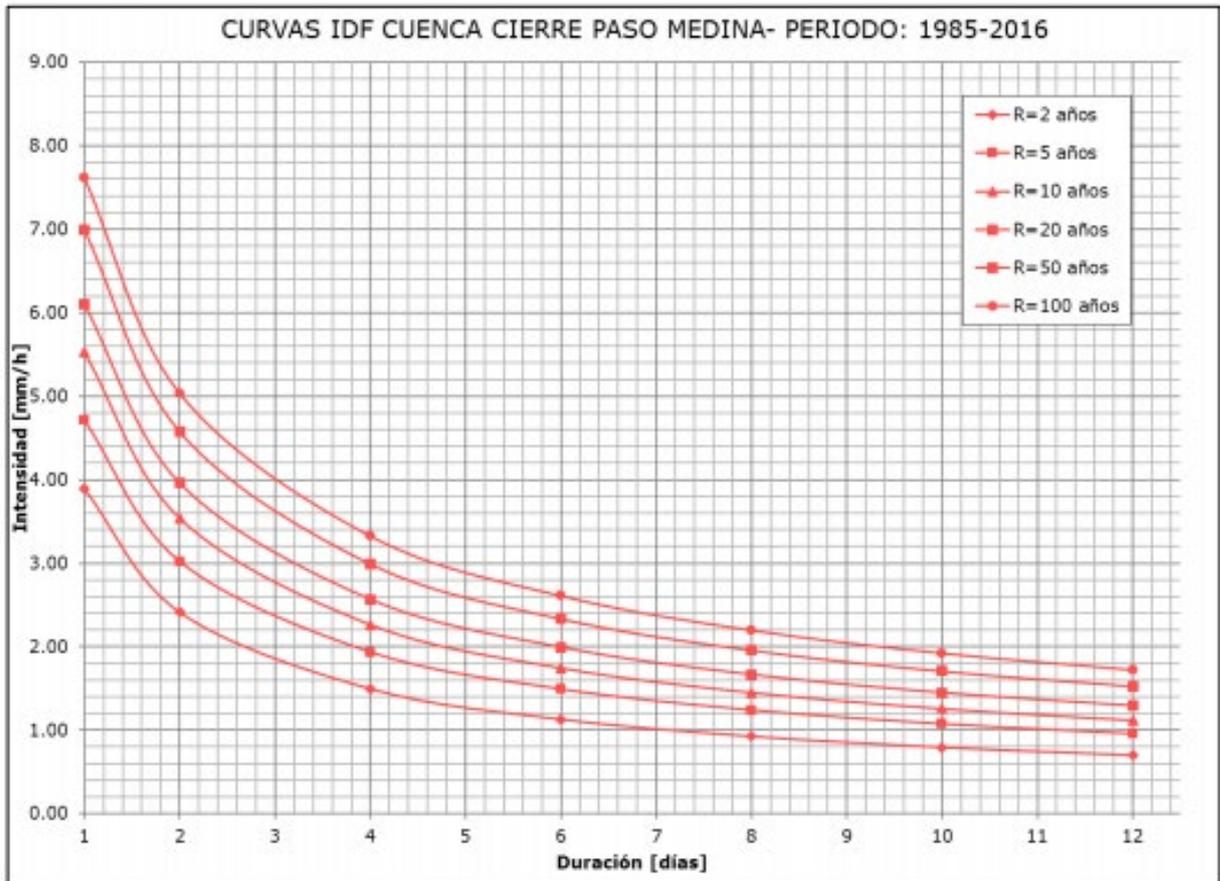


Figura 4.4 Curvas IDF. Cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina.

Las funciones que representan las curvas se muestran a continuación (Tabla 4.3):

$I_{R=2 \text{ años}} = \frac{592.60}{(d + 1.55)^{0.691}}$	$I_{R=20 \text{ años}} = \frac{575.13}{(d + 1.56)^{0.625}}$
$I_{R=5 \text{ años}} = \frac{506.24}{(d + 1.56)^{0.643}}$	$I_{R=50 \text{ años}} = \frac{604.52}{(d + 1.49)^{0.613}}$
$I_{R=10 \text{ años}} = \frac{601.99}{(d + 1.55)^{0.645}}$	$I_{R=100 \text{ años}} = \frac{590.19}{(d + 1.46)^{0.598}}$

Tabla 4.3. Funciones Curvas IDF.

Por otro lado, se calcularon los distintos hietogramas a ingresar en el modelo hidrológico para su transformación de lluvia-caudal mediante las dos distribuciones temporales antes mencionadas en el apartado "3.1.4 Distribución

Temporal de Tormentas”, correspondientes a bloques alternos y patrones temporales. Se calcularon para las duraciones de 4, 6, 8, 10 y 12 días, para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años

Para la distribución por patrones temporales se realizó un promedio de los patrones calculados por el estudio de tormentas de diseño para las distintas ciudades: Paraná, Concordia y Concepción del Uruguay. Con la finalidad de tomar una misma distribución temporal unificada para toda la provincia de Entre Ríos (Figura 4.5).

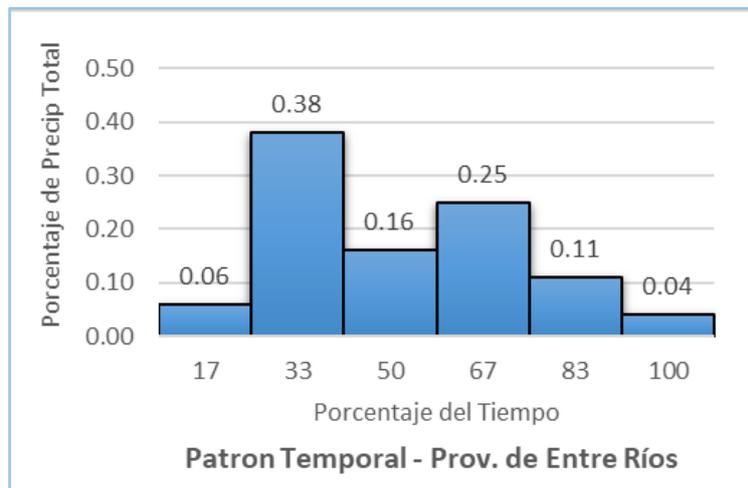


Figura 4.5. Promedio de Patrones Temporales.

Dependiendo del método de distribución temporal utilizado, los hietogramas resultantes presentan disposiciones muy diferentes, a modo de ejemplo se presentan dos hietogramas con la misma precipitación media areal, pero con distribuciones temporales diferentes (Figuras 4.6 y 4.7).

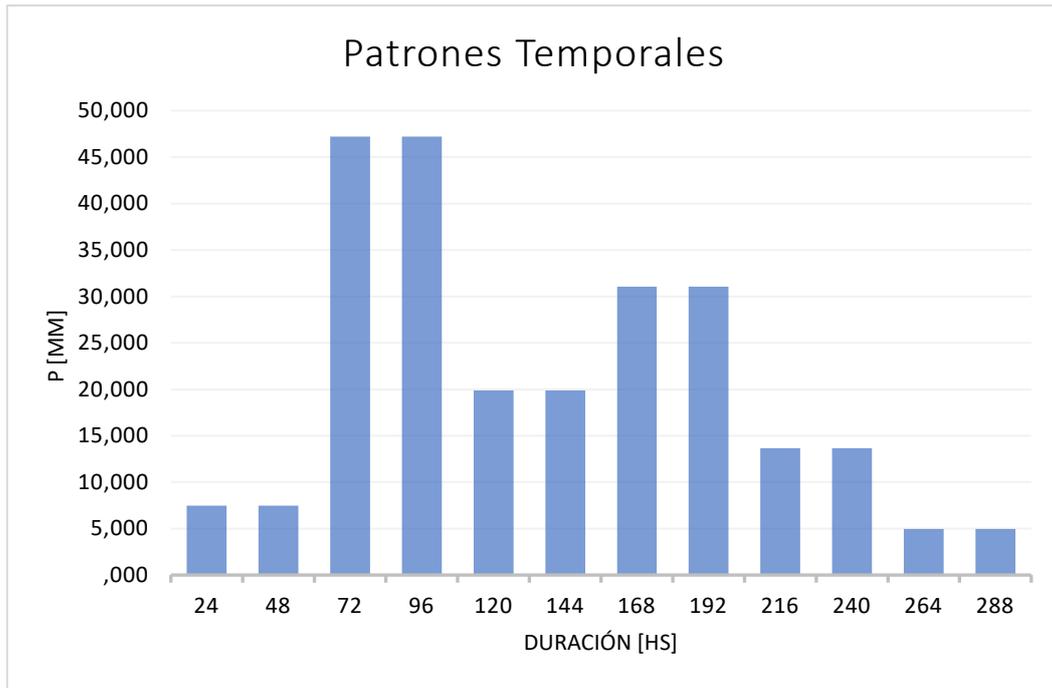


Figura 4.6. Distribución por Patrones Temporales.

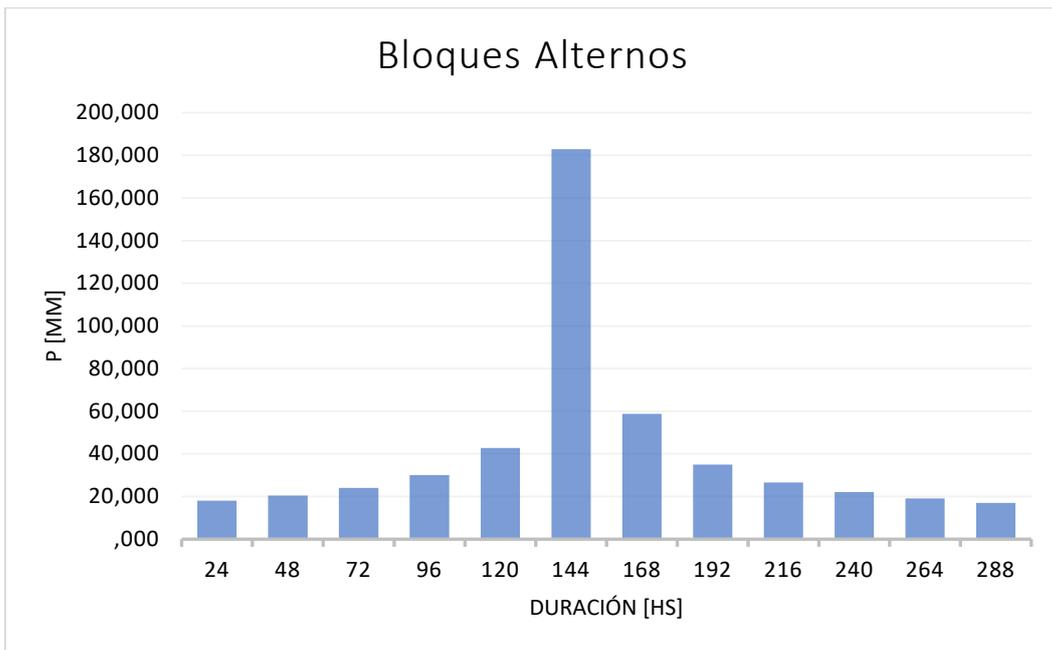


Figura 4.7. Distribución por Bloques Alternos.

4.3. Explotación del Modelo Hidrológico

Como se mencionó previamente en el apartado "4.1 A nivel de grandes cuencas", se contó con el modelo hidrológico calibrado por un estudio anterior (Justo Domé y Asociados, 2020) (Figura 4.8).

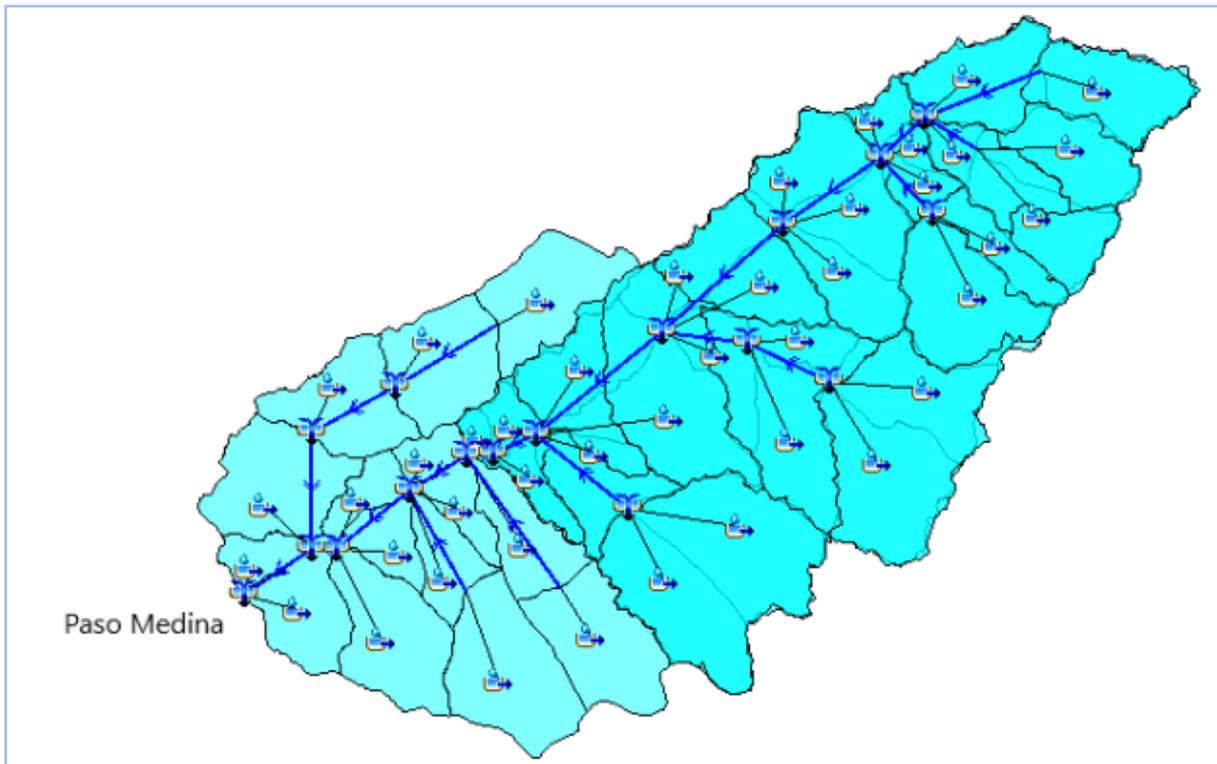


Figura 4.8. Modelo Hidrológico.

El mismo fue realizado en el programa HEC-HMS, es del tipo concentrado y está conformado por 36 subcuencas y 21 tramos de tránsito que conectan las distintas subcuencas, de las cuales se conocen sus características físicas como el área, longitud del cauce principal, cota inferior, superior y, además, el número de curva de cada subcuenca, que caracteriza la superficie la misma para el cálculo de la precipitación efectiva.

En cuanto a los métodos teóricos utilizados en el modelo, la precipitación efectiva se calcula por el método de CN, la transformación de precipitación efectiva a caudal se realiza utilizando el hidrograma unitario de Clark, y el tránsito a través de los cursos se desarrolla por el método de Muskingum-Cunge.

Una vez obtenidos los hietogramas por los distintos métodos de distribución temporal, se realizó la explotación del modelo hidrológico, asignando cada una de las precipitaciones calculadas a toda la superficie de la cuenca.

En la **Figura 4.9** se presenta una imagen de salida del modelo hidrológico de la subcuenca de primer orden "C20-2_ Arroyo Víboras", en la cual puede observarse en la parte superior, la precipitación ingresada al modelo en milímetros, correspondiente a una recurrencia de 50 años, y en el gráfico inferior, el hidrograma de salida de la subcuenca en metros cúbicos por segundo.

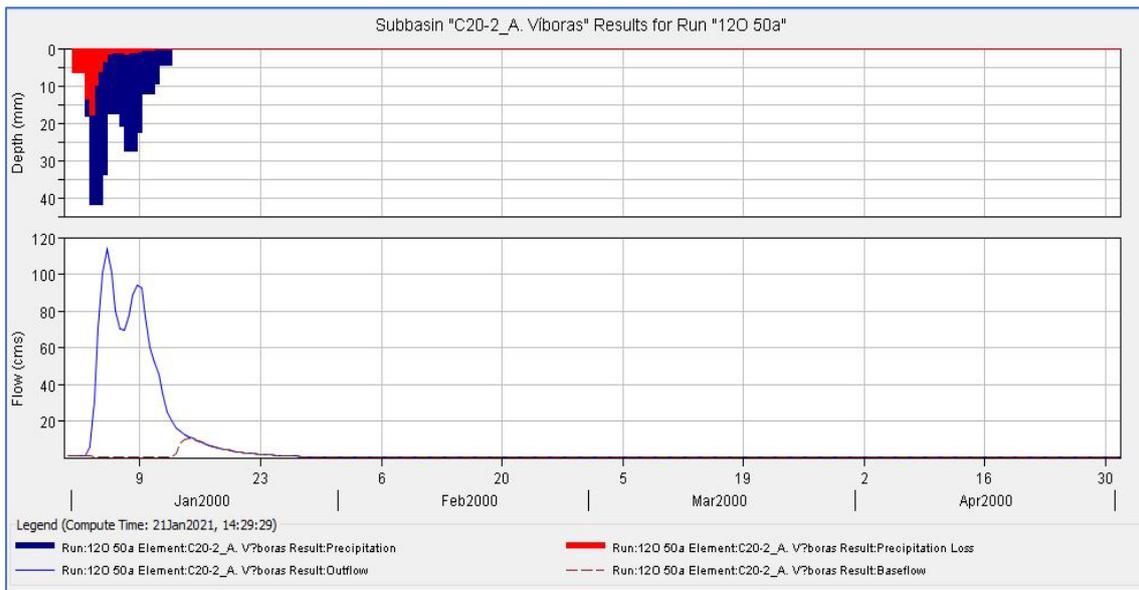


Figura 4.9. Hietograma e Hidrograma Modelo HEC-HMS – Subcuenca arroyo Víboras.

En la **Figura 4.10** puede observarse el hidrograma de salida correspondiente al tramo de tránsito N.º 20, para una recurrencia de 50 años.

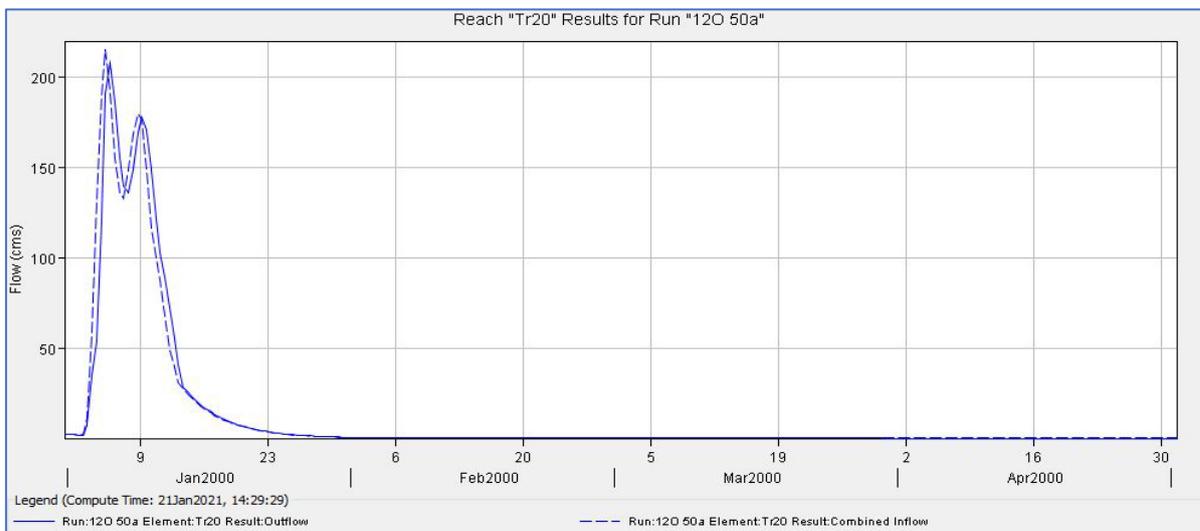


Figura 4.10. Hidrograma Modelo HEC-HMS – Tramo 20.

En la **Figura 4.11** se presenta el hidrograma en metros cúbicos por segundo, de la subcuenca de doceavo orden, Paso Medina, para una recurrencia de 50 años.

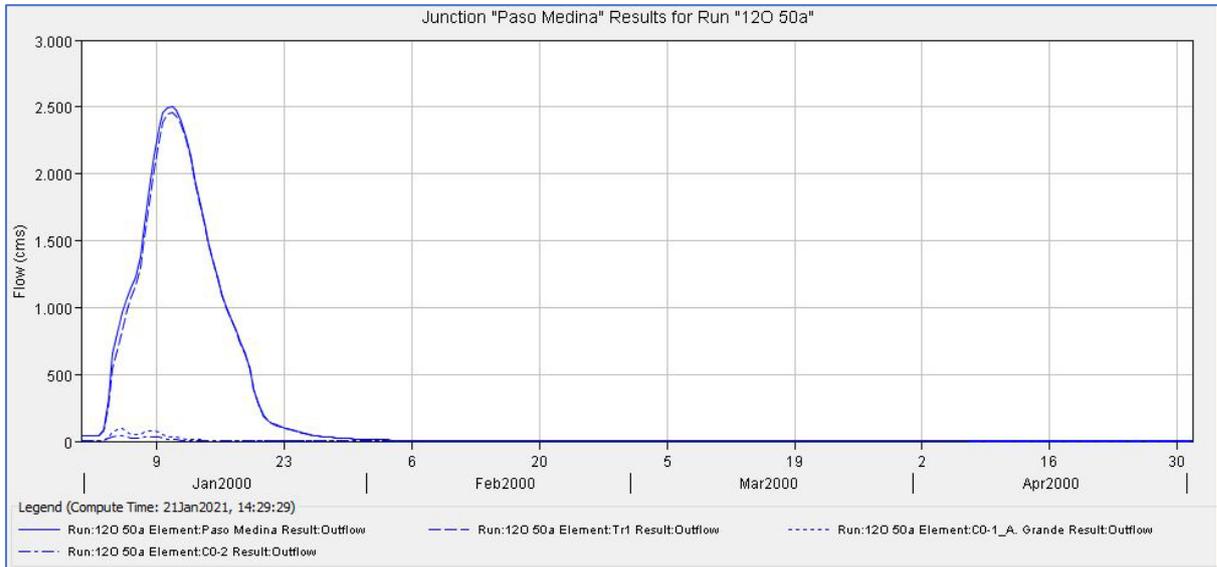


Figura 4.11. Hidrograma Modelo HEC-HMS – Subcuenca Paso Medina.

Posteriormente, este modelo hidrológico ya validado fue extendido hasta su desembocadura en el Río Paraná, tema que se desarrolla en el ítem **4.1.1.5** "Extensión del Modelo Hidrológico".

4.4. Selección de la tormenta y de la distribución de ajuste

A partir de los resultados de la explotación de modelo calibrado, se realizó una comparación entre los caudales calculados en el análisis de frecuencia de caudales máximos anuales de la estación de aforos de Paso Medina y los obtenidos en la simulación para las distintas distribuciones de tormentas seleccionadas, para la cuenca del Arroyo Feliciano en este punto.

En las siguientes tablas (**Tabla 4.4** y **Tabla 4.5**) se expone en función de la recurrencia y los días de duración, los valores de caudales obtenidos.

Tabla 4.4. Caudales máximos obtenidos con Patrones Temporales.

Resultados de Caudales Máximos con Patrones Temporales (m ³ /s)						
Probabilidad	Recurrencia	4 días	6 días	8 días	10 días	12 días
0,01	100	2471	2782,2	2957,6	3024,8	2973,3
0,02	50	2049	2369	2521,4	2585,7	2545,6
0,05	20	1594,3	1870,9	2012,5	2075	2061,6
0,1	10	1302,9	1502,6	1650,8	1689,4	1693,3
0,2	5	1029,3	1168,8	1275,9	1343,2	1362,5
0,5	2	725,3	742,6	787,9	816	838,2

Tabla 4.5. Caudales máximos obtenidos con Bloques Alternos.

Resultados de Caudales Máximos con Bloques Alternos (m ³ /s)						
Probabilidad	Recurrencia	4 días	6 días	8 días	10 días	12 días
0,01	100	2424,2	2853	2893,6	3239,6	3355,7
0,02	50	2075,2	2451,3	2651,7	2781,3	2880,4
0,05	20	1617,2	1955,2	2126,4	2234,9	2318,3
0,1	10	1322,9	1587,4	1739,4	1868,4	1904,5
0,2	5	1034,1	1234,7	1366,9	1447,3	1508,3
0,5	2	709,5	795,8	870,7	923,4	964,2

Con el fin de analizar la precisión estadística en los resultados de los caudales máximos obtenidos con el modelo hidrológico y encontrar la distribución de ajuste que más se asemeje a los valores arrojados por el modelo, se calcularon los errores a través del error cuadrático medio (ECM), de cada distribución de probabilidades calculada en el punto 4.1.1.2 con los resultados por Bloques Alternos y por Patrones Temporales.

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2.$$

Se presentan en la siguiente tabla los menores errores cuadráticos medios obtenidos en cada caso.

Tabla 4.6. Menores Errores Cuadráticos Medios.

Menores Errores Cuadráticos Medios (ECM)		
Distribución	Patrones Temporales	Bloques Alternos
Log Gauss	164,0	198,2
Pearson	63,8	89,5
Wakeby	182,1	209,3
Exponencial	126,2	171,4

La distribución probabilística de mejor ajuste fue la de Pearson, al compararla con la distribución temporal de Patrones Temporales.

En la Figuras 4.12 y 4.13 que se muestran a continuación se comparan los valores de caudales máximos obtenidos en el **AFMulti** para la distribución de **Pearson** con los valores obtenidos en el modelo hidrológico, a partir de los dos métodos de distribución temporal de precipitaciones, para las distintas duraciones de tormentas.

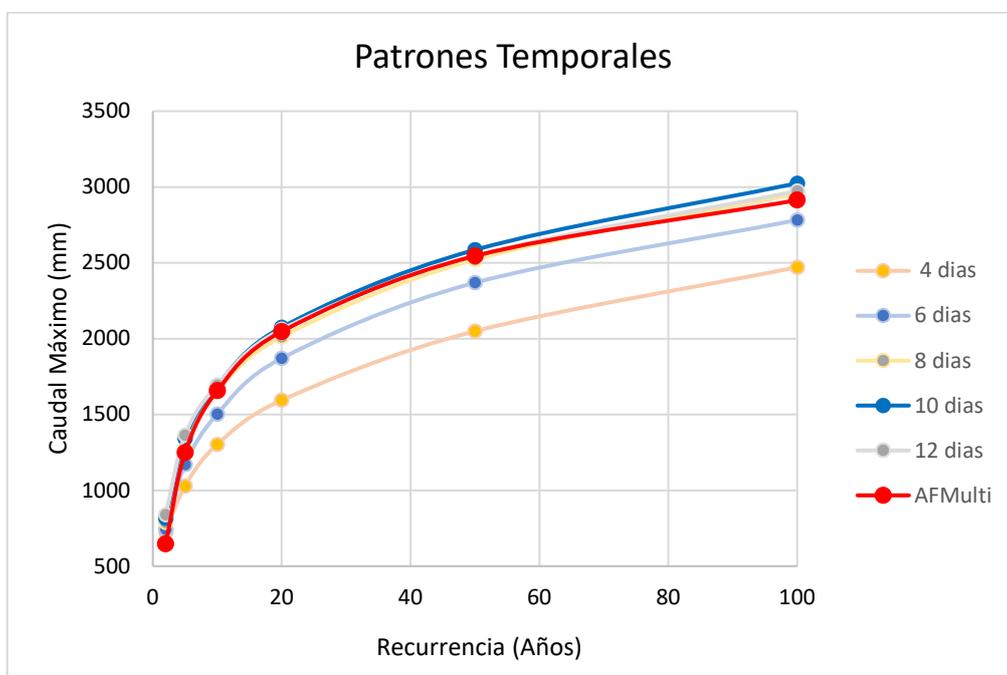


Figura 4.12. Comparación Pearson – Modelo Hidrológico por Patrones Temporales.

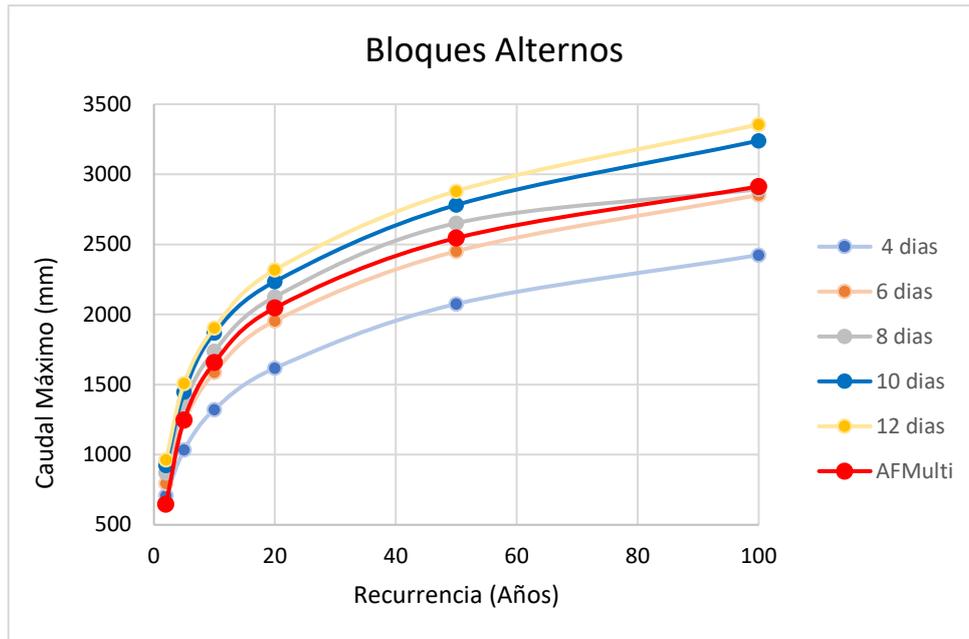


Figura 4.13. Comparación Pearson – Modelo Hidrológico por Bloques Alternos.

La distribución por Bloques Alternos plantea que la intensidad media de la tormenta de diseño para cualquier duración centrada respecto al tiempo de la intensidad de lluvia pico, sea igual a la intensidad obtenida de la curva IDF para dicha duración, lo cual es poco real, resultando un hietograma muy empuntado y caudales extremos.

Debido a que la distribución por Patrones Temporales se asemeja en mayor medida a la realidad debido a que corresponde a un estudio anterior de precipitaciones medidas en la provincia de Entre Ríos, se decidió tomar esta como referencia.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el tiempo de concentración de la cuenca del Arroyo Feliciano en Paso Medina es de 4 días aproximadamente, y la duración de tormenta de mejor ajuste fue entre la de **8 y 12 días**, se llegó a la conclusión que, para obtener caudales máximos en las distintas subcuencas del Arroyo Feliciano utilizando el modelo hidrológico, en el cálculo de hietogramas de las subcuencas de distintos órdenes, la duración del hietograma debía ser entre **2 y 3 veces el tiempo de concentración** de la subcuenca.

4.5. Extensión del Modelo Hidrológico

Aguas abajo a la Estación Paso Medina, se añadieron 20 subcuencas al modelo hidrológico, de las cuales, al igual que a las pertenecientes al modelo inicial, se conocen sus parámetros y características físicas mencionadas en el ítem 3.2.

De esta manera, el modelo hidrológico alcanzó la desembocadura de la cuenca del Arroyo Feliciano en el Río Paraná (Figura 4.14).

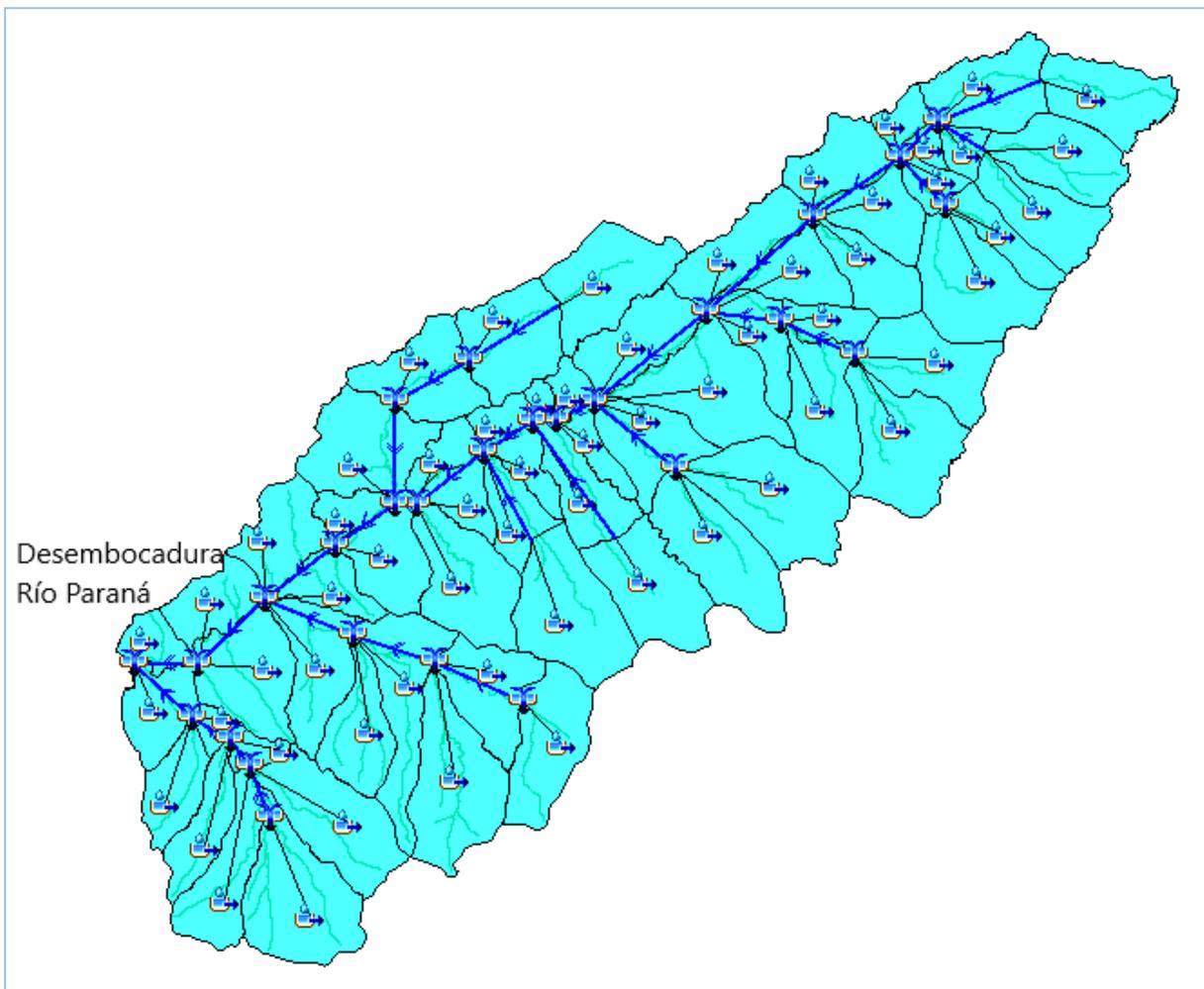


Figura 4.14. Modelo Hidrológico Extendido.

A continuación, se presentan los resultados de caudales máximos obtenidos para la cuenca completa para las distintas recurrencias. La duración de la tormenta adoptada fue de 12 días, el proceso de cálculo para su determinación se encuentra en el inciso "4.1.1.7 Cálculo de Hietogramas para las Subcuencas".

Tabla 4.6. Resultados de Caudales Máximos Obtenidos – Cuenca Completa.

Cuenca del Arroyo Feliciano Completa	
Recurrencia	Caudal (m ³ /s)
2 años	1.361,2
5 años	1.989,8
10 años	2.480,1
20 años	3.053,3
50 años	3.798,1
100 años	4.428,8

4.6. Jerarquización de Subcuencas

Se realizó la clasificación de las subcuencas, organizándolas en distintos órdenes. Estos se determinaron según la cantidad de tramos recorridos por el cauce principal dentro de una subcuenca hasta el cierre de la misma. Se define como tramo a segmento que se encuentra entre dos confluencias consecutivas; entre un nacimiento y la siguiente confluencia; o entre la última confluencia y la salida de la cuenca.

De esta manera, al cerrarse la cuenca de primer orden, comienza otro tramo del cauce principal que finaliza cuando se cierra la cuenca de segundo orden, el tercer tramo continúa al finalizar el tramo anterior y termina cuando se cierra la cuenca, y así sucesivamente.

Para la jerarquización, se le asignó el orden N. °1 a todos los nacimientos, es decir, las corrientes que no se bifurcan cuando se recorren aguas arriba y se los conoce como cursos de primer orden. La clasificación del drenaje aumenta si los cursos confluyen. Al avanzar aguas abajo, cuando dos corrientes de orden diferente se encuentran, el canal aguas abajo aumenta su orden.

Por lo tanto, una confluencia de dos cursos de primer orden creará un curso de segundo orden, la confluencia de un curso de segundo orden con uno de

tercer orden origina uno de cuarto orden, y así sucesivamente, como se muestra en la **Figura 4.15**

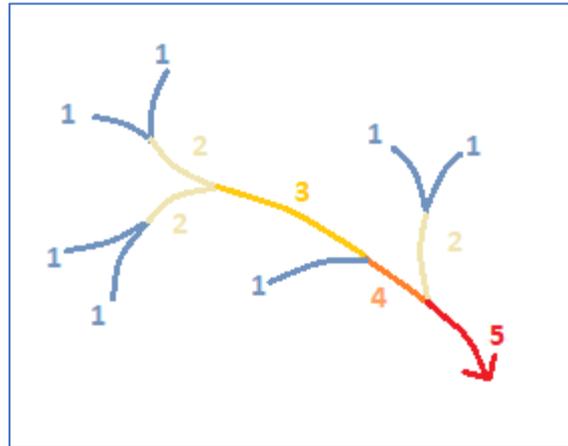


Figura 4.15. Método de Jerarquización de Subcuencas.

Para la división y jerarquización de las subcuencas se utilizó el software de Sistemas de Información Geográfica QGIS, el cual emplea Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), conformados por imágenes satelitales, proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Los MDE son imágenes que permiten describir topografía del terreno a través de puntos distribuidos en forma homogénea sobre la superficie terrestre y cuya altura está referida al nivel medio del mar.

A partir de un análisis de datos digitales del terreno, QGIS permite trazar las trayectorias de drenaje y delimitar cuencas creando una base de datos espacial para la región analizada, de la cual se pueden extraer los datos para cada cuenca de interés y a partir de ello calcular los parámetros fisiográficos. Además, posibilita visualizar y generar los mapas para cada orden de subcuencas.

De esta manera se generaron los mapas para los distintos órdenes de las subcuencas, alcanzando el orden 15º como máximo, al tomar la cuenca completa. En la **Figura 4.16** se muestra la imagen satelital de la cuenca completa con los cursos de agua, a partir de la cual se jerarquizaron todas las subcuencas.

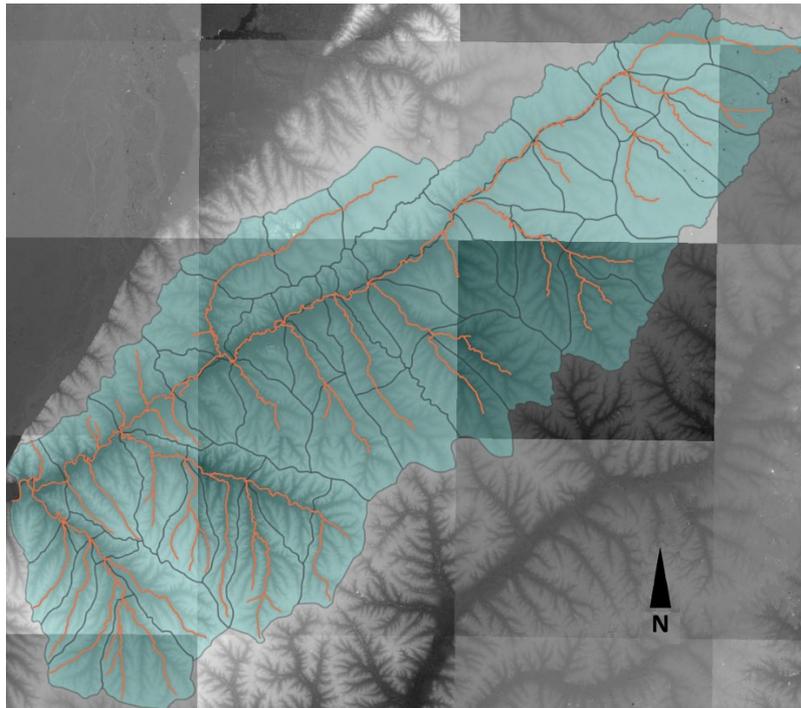


Figura 4.16. Cuenca Completa del Arroyo Feliciano y Cursos de Agua.

En la Figura 4.17 se muestra la definición de las subcuencas de 1er Orden y posteriormente en las Figuras 4.18 y 4.19, las subcuencas 2do y 3er Orden, a fin de exponer cómo se agrupan las subcuencas al aumentar su orden.

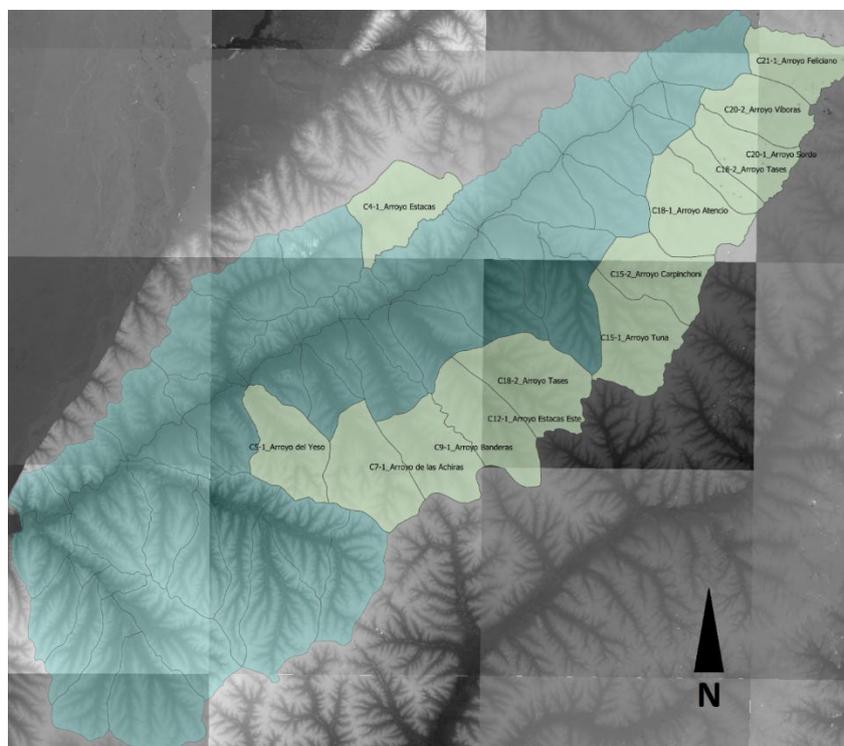


Figura 4.17. Subcuencas de 1er Orden.

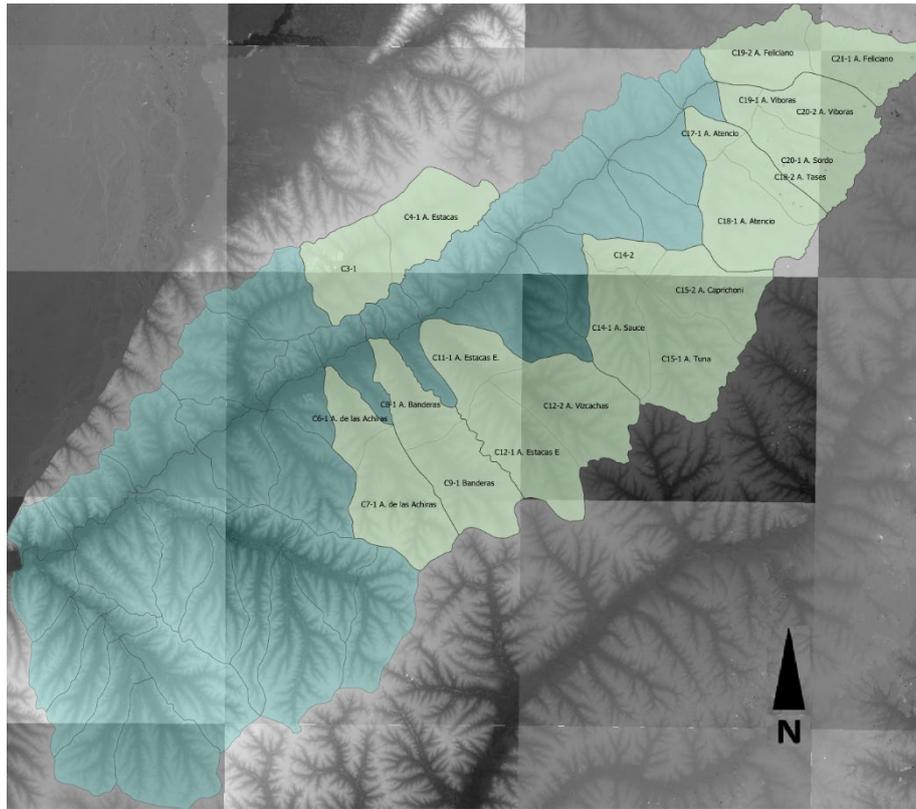


Figura 4.18. Subcuencas de 2do Orden.

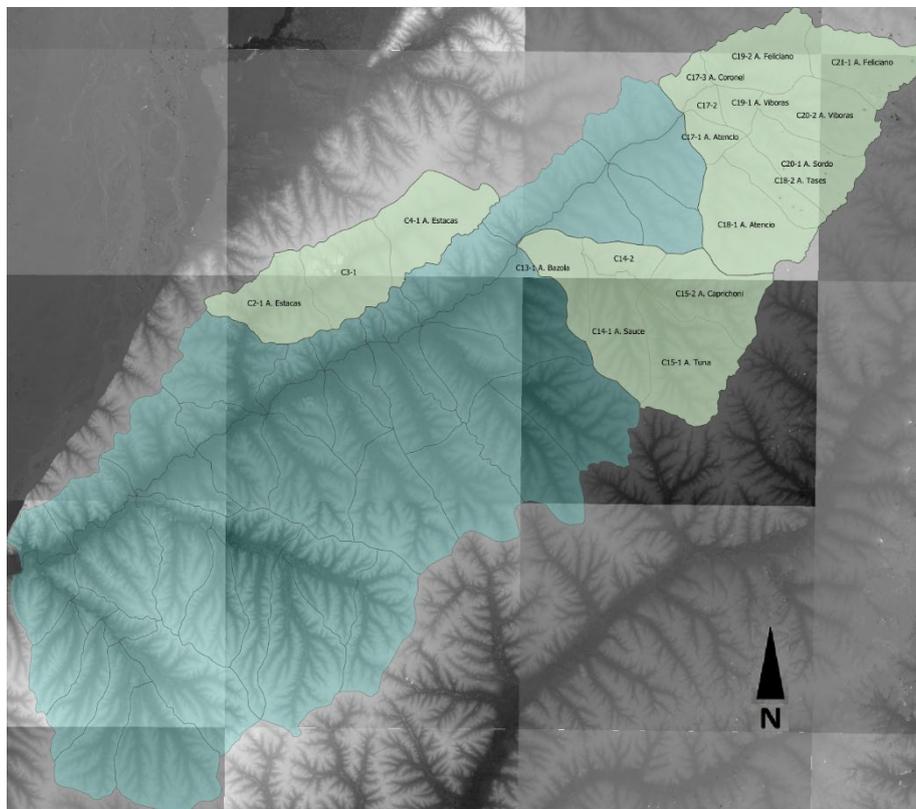


Figura 4.19. Subcuencas de 3er Orden.

4.7. Cálculo de Hietogramas para las subcuencas

Una vez delimitadas y clasificadas las subcuencas en órdenes del 1º al 15º se procedió al cálculo de las tormentas de diseño para cada una de las mismas. Para ello se utilizaron las mismas curvas IDF desarrolladas en el “Estudio de Tormentas de Diseño de cuenca extensas en la provincia de Entre Ríos” (Lopez et al., 2020).

En dicho trabajo se desarrollaron tres curvas IDF diferentes, considerando tres estaciones de cierre o de referencia, seleccionando las intersecciones del cauce principal con la Ruta Provincial N°6 (Paso Medina), la Ruta Provincial N°2, y el cierre total de la cuenca, en la desembocadura en el Río Paraná (Figura 4.20).

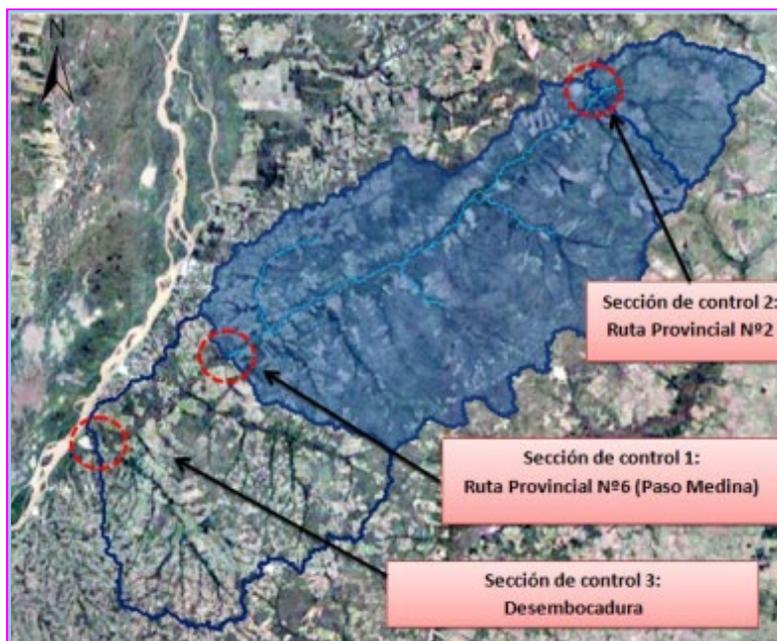


Figura 4.20. Delimitación de Subcuencas para Curvas IDF.

La elección de la estación de referencia a utilizar en cada orden de subcuencas fue tomada calculando el promedio de las áreas de las subcuencas pertenecientes a cada orden, de acuerdo con la jerarquización realizada, adoptando la estación de referencia cuya área es la más cercana, inmediata superior o inferior al promedio del orden.

Después de seleccionar la estación de referencia y calculada la precipitación media a partir de la curva IDF correspondiente, la precipitación media fue afectada por el Coeficiente de Abatimiento Areal (CAA), esto se fundamenta en que las precipitaciones locales son válidas para un radio de pocos kilómetros, en Bacchiega et al., (2004) se asume que una precipitación puede considerarse homogénea en un área de 25 **km²** en torno a la base de estación.

La precipitación media difiere del máximo local, por eso habitualmente en los estudios hidrológicos se estima la precipitación de diseño afectando a la precipitación media por el coeficiente de abatimiento areal, el cual es una función del área de la cuenca y la duración de la tormenta.

Posteriormente, se afectaron las precipitaciones medias areales de cada subcuenca en función del área de las subcuencas a través del Coeficiente de Abatimiento Areal, el cual se obtuvo Proyecto de Investigación y Desarrollo de Estudio de Tormentas de Diseño en las cinco cuencas más extensas de la provincia de Entre Ríos (López et al., 2020).

Luego, se realizó la distribución temporal de las precipitaciones por el método de Patrones Temporales, el cual presentó un mejor ajuste cuando se analizó la cuenca completa en primera instancia.

A su vez, la duración de la tormenta de cada subcuenca se definió de acuerdo con la relación obtenida entre el tiempo de concentración y la duración de tormenta de mejor ajuste al analizar la cuenca en la estación de aforos de Paso Medina.

En el apartado "4.1.1.4 Selección de la tormenta y de la distribución de ajuste" se definió que la duración de la tormenta debe estar entre 2 y 3 veces el valor del tiempo de concentración de cada subcuenca. En el cálculo se adoptaron valores de duración de tormenta redondeados de 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8, 10 y 12 días.

En la siguiente tabla se muestran el tiempo de concentración promedio y las duraciones de tormentas adoptadas para cada orden.

Tabla 4.7. Tiempos de Concentración Promedio y Duraciones de Tormenta Adoptadas.

Orden	Tiempo de Concentración Promedio (hs)	Duración de Tormenta Adoptada (días)	Orden	Tiempo de Concentración Promedio (hs)	Duración de Tormenta Adoptada (días)
1°	14,04	1 día y 1,5 días	9°	83,43	10 días
2°	22,65	2 días	10°	90,42	10 días
3°	30,6	3 días	11°	90,75	10 días
4°	37,25	4 días	12°	99,83	12 días
5°	51,1	6 días	13°	108,04	12 días
6°	65,07	8 días	14°	117,74	12 días
7°	74,26	8 días	15°	122,26	12 días
8°	76,66	8 días			

A continuación, a modo de ejemplo se presenta la secuencia de cálculo del hietograma correspondiente a la **Subcuenca "Junction 22" de 15º Orden**.

En primera instancia se calculó el tiempo de concentración según la fórmula de Kirpich, en función de la longitud del cauce principal y la diferencia entre cotas superior e inferior. A partir de este valor se adoptó una duración de tormenta de entre 2 y 3 veces su magnitud. (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Cálculo de duración de la Tormenta.

Subcuenca	Área	Longitud Cauce Principal	Cota Inferior	Cota Superior	Pendiente	Tiempo de Concentración Kirpich	Tiempo para IDF	
	[km ²]	[m]	[m]	[m]	[m/m]	[hs]	[hs]	días
Junction 22	8.210,49	268.494,9	17,2	81	0,0002	122,26	305,6	12,7
Duración de la Tormenta adoptada							12 días	

Posteriormente, se calcularon los Coeficientes de Abatimiento Areal y la Precipitación Media Areal en base a cada recurrencia según la estación de referencia adoptada y la duración de la tormenta (Tabla 4.9).

Tabla 4.9 Cálculo de los Coeficientes de Abatimiento Areal y Precipitación Media Areal.

DATOS EXTRAÍDOS DE PID 3882		ESTACIÓN DE REFERENCIA		SUBCUENCAS						
		PASO MEDINA	A:5538Km ²	ORDEN 15°			A:8210Km ²			
R	Duración	Coeficientes de la Ecuación: CAA = M x ln (A) + N		COEFICIENTES IDF			PMA(ER)	CAA(ER)	PMA(O1)	CAA(O1)
Años	Días	M	N	A	B	C	mm		mm	
2	12	-0,01	1,08	592,6	1,55	0,691	201,37	0,98	200,40	0,97
5	12	-0,03	1,11	506,24	1,56	0,643	274,78	0,88	271,45	0,87
10	12	-0,03	1,13	601,99	1,55	0,645	320,44	0,84	315,31	0,82
20	12	-0,04	1,15	575,13	1,56	0,625	372,11	0,81	364,83	0,79
50	12	-0,05	1,17	604,52	1,49	0,613	439,71	0,75	428,36	0,73
100	12	-0,06	1,19	590,19	1,46	0,598	496,95	0,71	481,45	0,69

Por último, se realizó la distribución temporal de los hietogramas a partir de los Patrones Temporales Promedios adoptados para toda la provincia de Entre Ríos. En la **Tabla 4.10** se encuentra la distribución temporal del hietograma correspondiente a una recurrencia de 2 años, en la **Figura 4.21**, se encuentra el gráfico del hietograma a ingresar en el modelo hidrológico.

Tabla 4.10. Cálculo del Hietograma.

Tiempo de recurrencia: 2 años			
Duración de la tormenta adoptada: 12 días 288 hs			
ΔT :			24 hs
Intensidad: 0,697 mm/hs			
Duración [hs]	Duración [min]	SPm [%]	ΔS [mm]
24	1440	3,00%	6,03
48	2880	3,00%	6,03
72	4320	19,00%	38,16
96	5760	19,00%	38,16
120	7200	8,00%	16,07
144	8640	8,00%	16,07
168	10080	12,50%	25,11
192	11520	12,50%	25,11
216	12960	5,50%	11,05
240	14400	5,50%	11,05
264	15840	2,00%	4,02
288	17280	2,00%	4,02
		100,00%	200,85

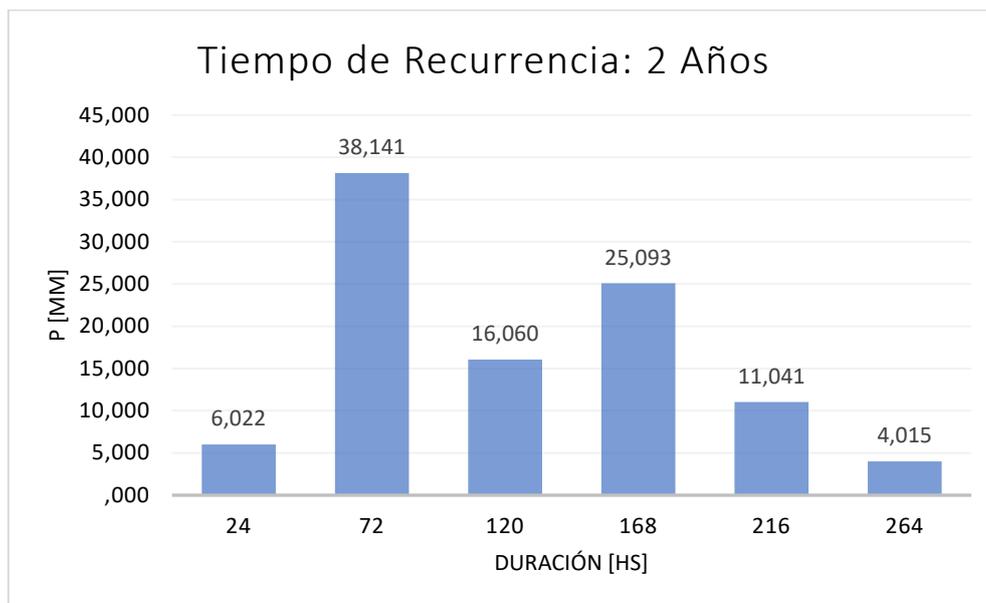


Figura 4.21. Hietograma Subcuenca "Junction 22" – Recurrencia 2 Años.

4.8. División y explotación del Modelo Hidrológico

Para obtener los caudales máximos se subdividió el modelo hidrológico extendido en 15 modelos distintos, correspondientes a cada uno de los órdenes del 1º al 15º.

Se ingresaron los hietogramas respectivos a cada subcuenca y se realizaron las explotaciones de los modelos, obteniendo los resultados de caudales máximos de cada subcuenca para las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

A continuación, en la **Figura 4.22** se muestra el modelo hidrológico de las subcuencas pertenecientes al 1er Orden.

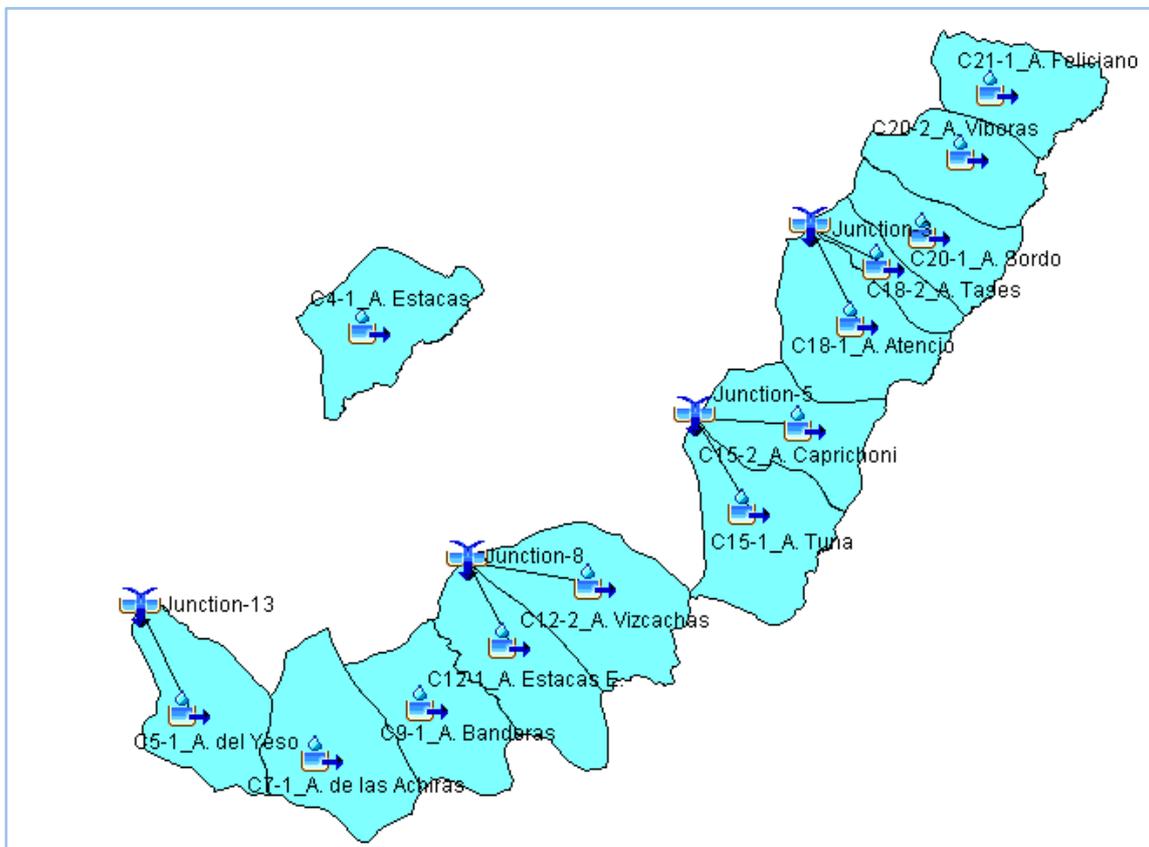


Figura 4.22. Modelo Hidrológico – 1er Orden.

4.9. Parámetros de estimación

Seguidamente al cálculo de caudales de todas las subcuencas por órdenes, se elaboró un listado de 12 variables y parámetros de cada una de ellas, a fin de realizar un análisis a través de métodos estadísticos multivariado con el propósito de relacionar los resultados de los caudales obtenidos con el resto de las variables.

Las variables y parámetros considerados fueron:

- *Área (km^2)*
- *Raíz cuadrada del Área (km)*

Esta variable ha sido considerada debido a que diversos autores han desarrollado estudios en los que enuncian que la raíz cuadrada del área es un factor relacionado directamente con el caudal, aún más que el área.

- *Perímetro (km)*
- *Índice de Compacidad*
- *Longitud del Cauze Principal (km)*
- *Pendiente del Cauze ($\frac{m}{m}$)*
- *Tiempo de Concentración (h)*
- *Coeficiente de Almacenamiento – R de Clark (h)*
- *Coeficiente λ*
- *Curva Número*
- *Precipitación Media Areal (mm)*

Todas las variables y parámetros fueron explicadas en el capítulo 3, “Metodologías utilizadas”

Cabe aclarar, que la recurrencia no fue analizada entre las variables de estudio debido a que su consideración se encuentra dentro del cálculo de la Precipitación Media Areal ingresada al modelo hidrológico.

A continuación, en la **Tabla 4.11** se muestra el listado de variables y parámetros correspondientes a la **Subcuenca “Junction 22” de 15º Orden** para una recurrencia de 2 años.

Tabla 4.11. Variables y Parámetros – Subcuenca "Junction 22".

			Orden	15°
			Cuenca	Junction 22
Nº	Parámetro	Símbolo	Unidad	
1	Caudal	Q _{2años}	[m ³ /s]	1361,20
2	Area	A	[Km ²]	8210,49
3	Raíz cuadrada del Área	A ^{0,5}	[Km]	90,61
4	Perímetro	P	[Km]	523,61
5	Coef.Compacidad o Índice Gravelius	Kc	[-]	1,62
6	Longitud cauce principal	L	[Km]	268,49
7	Pendiente cauce	S	[m/m]	0,000240
8	Tiempo concentración	Tc	[h]	122,26
9	Coeficiente de almacenamiento	R	[h]	78,89
10	Coeficiente lambda (R/Tc)	l	[-]	0,65
11	Número de curva ponderado	CN	[-]	76,73
12	Precipitación Media Areal	PMA	[mm]	200,40

4.10. Análisis Multivariado y selección de variables

A partir de las tablas mencionadas en el punto anterior, se generó una gran matriz de datos para cada una de las 6 recurrencias evaluadas, en las 36 subcuencas con 12 variables cada una. Las cuales fueron analizadas mediante 3 métodos estadísticos multivariados con la ayuda del software RStudio, con el fin de seleccionar las 5 variables que poseen una mayor significación en la expresión del caudal para posteriormente realizar el agrupamiento en regiones hidrológicamente homogéneas.

Los tres métodos estadísticos-matemáticos utilizados fueron:

– Análisis de Correlación

Como se mencionó en el Marco Teórico, el análisis de correlación entre variables consiste en obtener un coeficiente de valor entre 0 y 1 que representa la linealidad o dependencia entre dos variables, cuanto más cercano a 1 sea el

coeficiente, mayor correlación posee el par de variables. En la Figura 4.23 y 4.24 se muestran los coeficientes de correlación entre las variables para la recurrencia de 2 años.

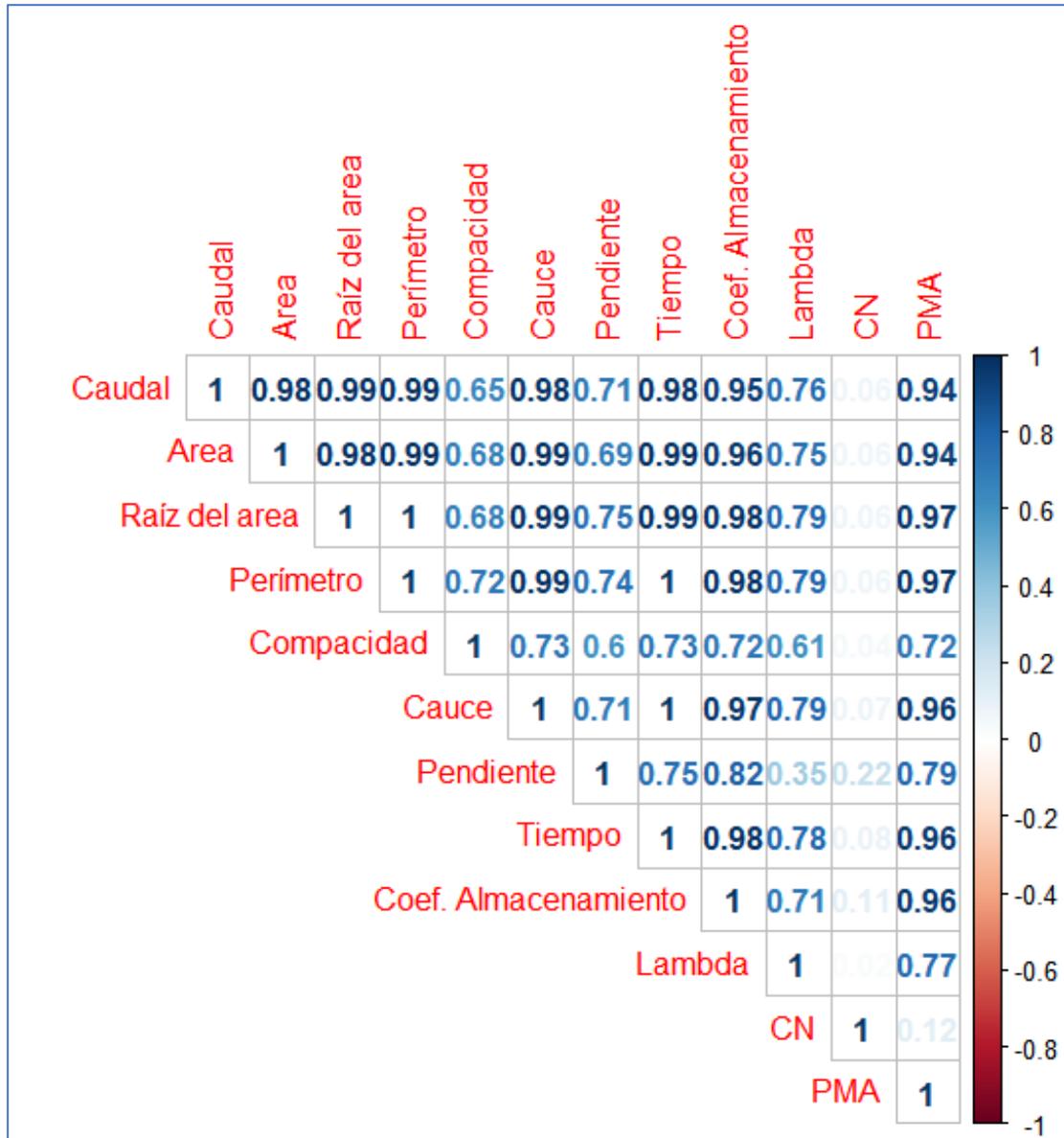


Figura 4.23. Coeficientes de Correlación entre Variables – Recurrencia 2 Años.

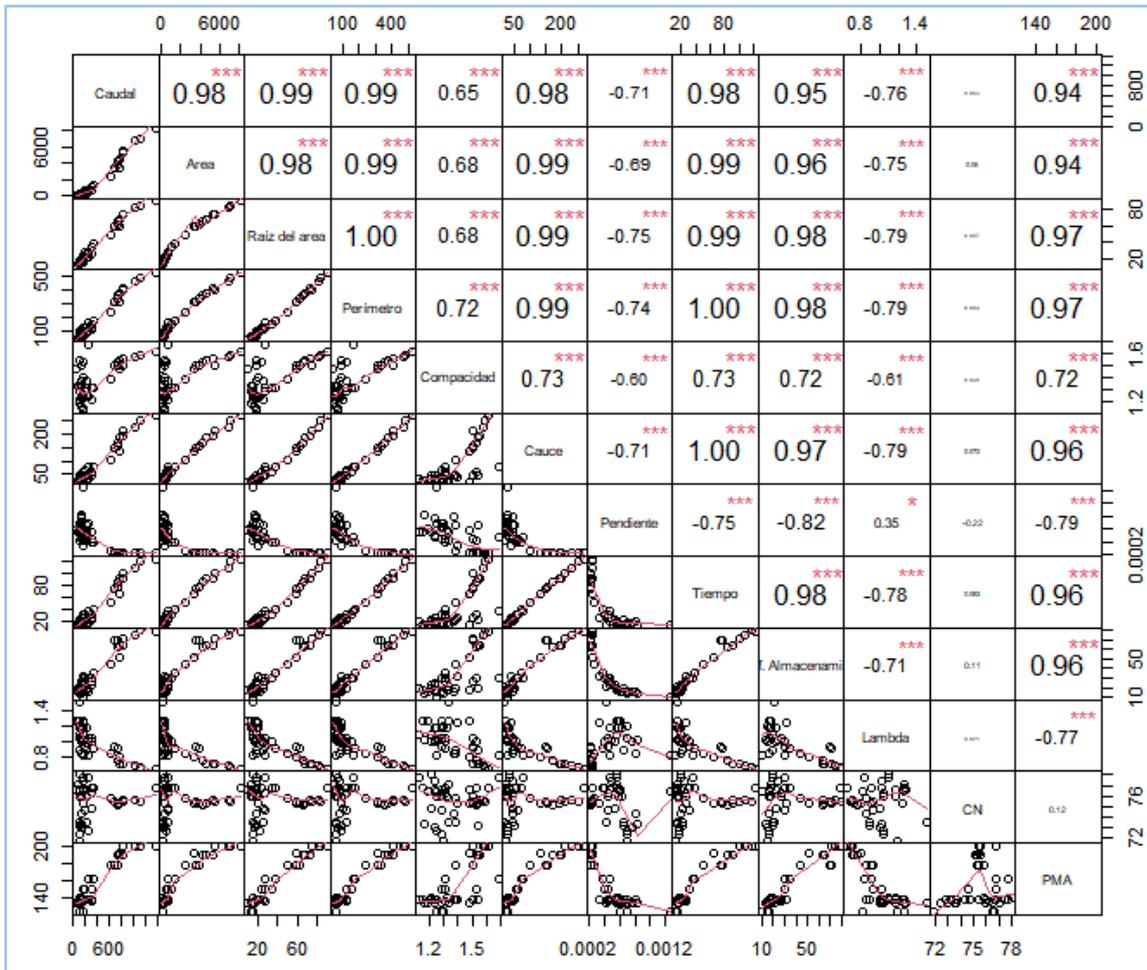


Figura 4.24. Coeficientes de Correlación entre Variables – Recurrencia 2 Años.

Por medio del cálculo de los coeficientes de correlación, puede notarse que las variables con una mayor correlación al caudal son el área, la raíz del área, el perímetro, la longitud de cauce, el tiempo de concentración, el coeficiente de almacenamiento y la precipitación media areal.

Los Coeficientes de Correlación fueron calculados para las recurrencias de 5, 10, 20, 50 y 100 años, los cuales varían en magnitud mínima con respecto al de 2 años de recurrencia.

– Análisis de Componentes Principales

Se calcularon las componentes y la proporción de estas, con ella se definieron las dos componentes principales, es decir, las que poseen mayor proporción y se graficaron como vectores (Dim 1 y Dim2) para cada una de las variables (Figura 4.25).

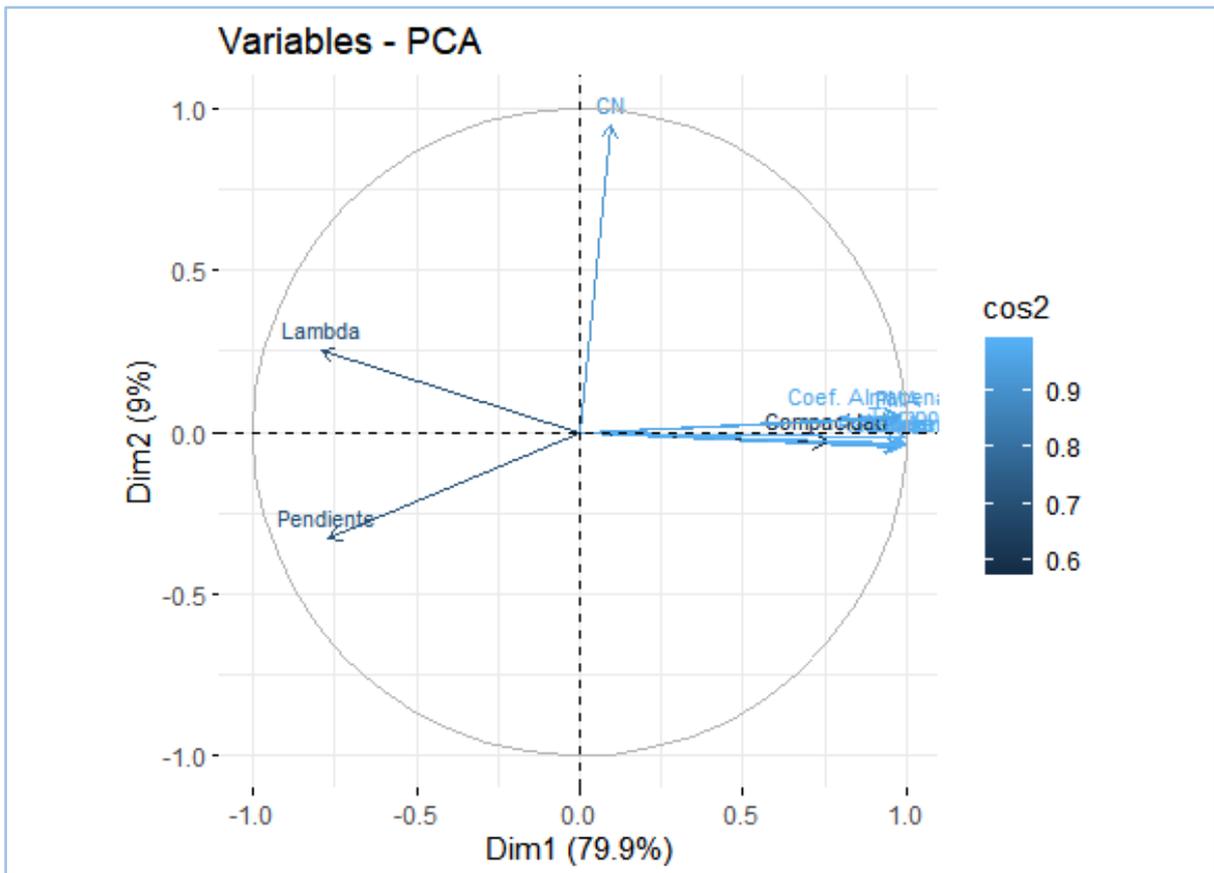


Figura 4.25. Análisis de Componentes Principales – Recurrencia 2 Años.

Como se mencionó en el apartado "2.4 Análisis Estadístico Multivariado", al graficar las dos componentes principales en un par de ejes coordenados en las direcciones X-Y, pueden observarse las relaciones entre las variables según coincidan o no la magnitud y dirección de los vectores.

A partir de los resultados, puede notarse la existencia de un grupo integrado por la mayoría de las variables, incluido en ellas el caudal, cuyas magnitudes y direcciones son prácticamente coincidentes, y, por otro lado, la pendiente, el coeficiente lambda y el número de curva poseen un comportamiento diferente.

El Análisis de Componentes Principales arrojó idénticos resultados para las recurrencias de 5, 10, 20, 50 y 100 años.

– **Agrupamiento de Conglomerados – Clustering**

Como se mencionó en el apartado “3.2.2 Análisis Estadístico Multivariado”, este método consiste en situar las variables o individuos en grupos homogéneos, también llamados conglomerados o cluster, los cuales no son conocidos de ante mano, pero surgen de la naturaleza de los datos en sí mismos. Para realizar este análisis es necesario medir la distancia que relaciona los individuos, lo cual puede realizarse a través de distintos métodos.

Se han analizado los siguientes:

En este dendrograma (Figura 4.26) se puede observar que el caudal está relacionado con el área en mayor medida, y en un nivel inferior se relaciona con la longitud de cauce, el perímetro, el tiempo de concentración, el coeficiente de almacenamiento de Clark y la precipitación media areal.

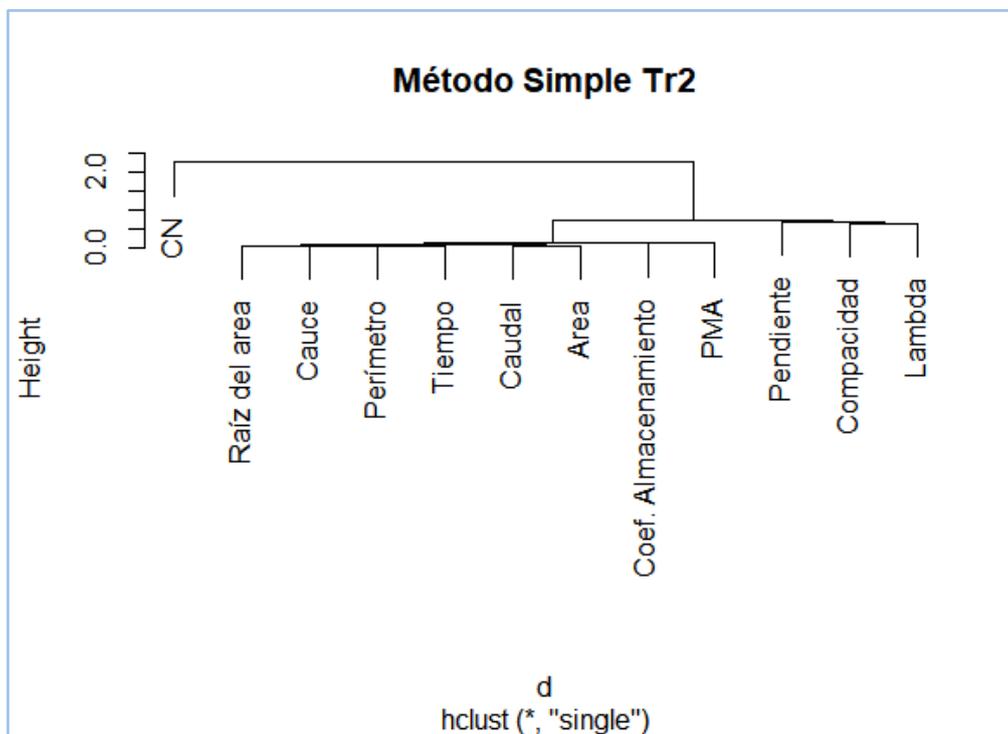


Figura 4.26. Método Simple o de distancias mínimas – Recurrencia 2 Años.

A través de los dendrogramas graficados por el método del Centroide y de Ward (Figuras 4.27 y 4.28) se puede notar que las variables con mayor relación al caudal son las mismas que observadas por medio del método simple.

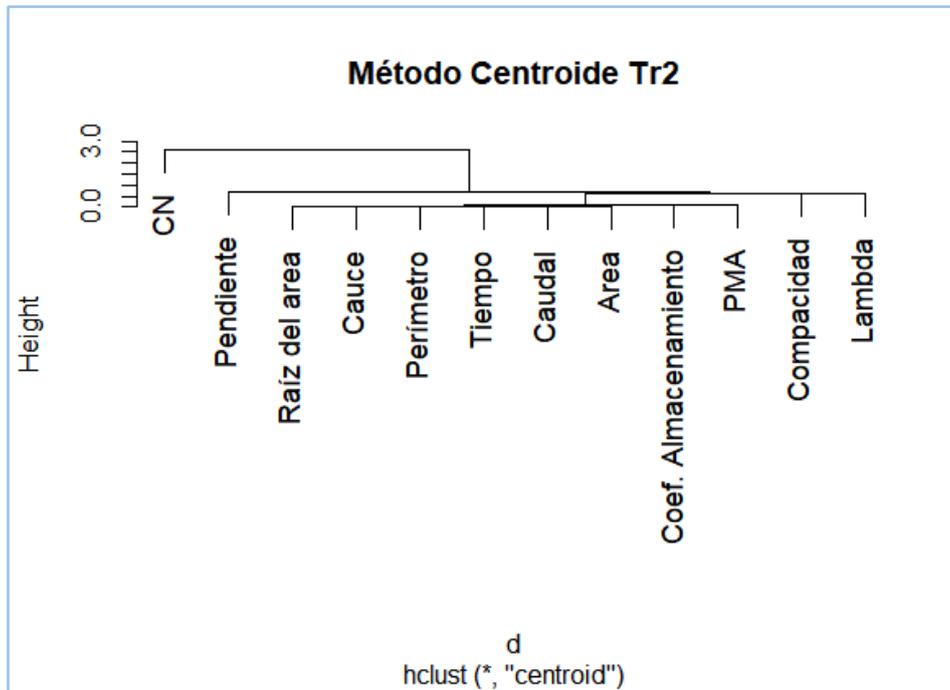


Figura 4.27. Método del Centroide – Recurrencia 2 Años.

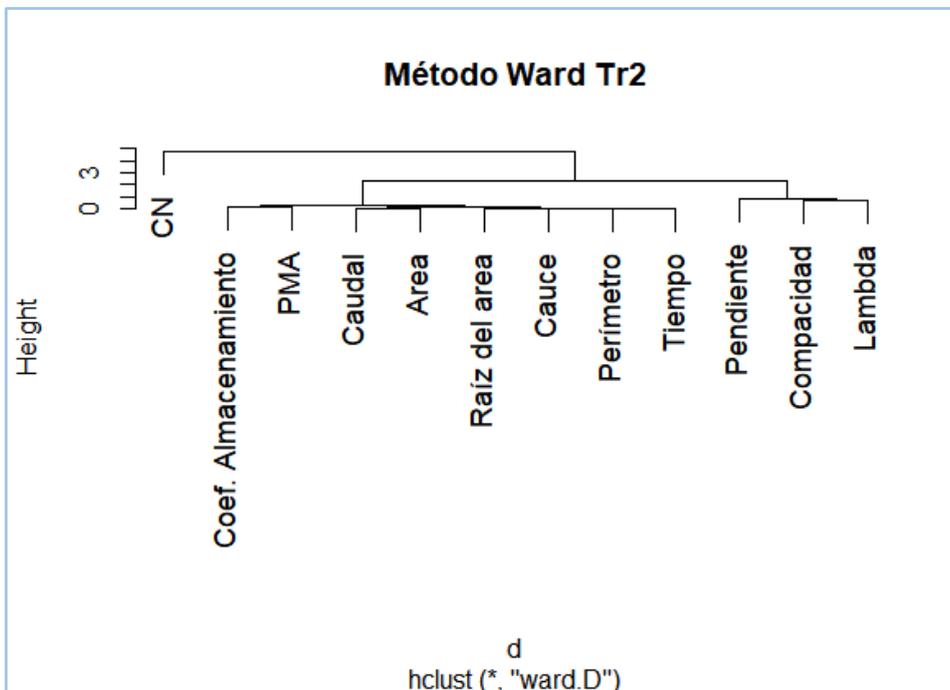


Figura 4.28. Método de Ward o de mínima varianza – Recurrencia 2 Años.

Al igual que en los métodos anteriores, mediante el método Completo (Figura 4.28) se aprecia que el área es la variable más directamente relacionada

con el caudal, y en una menor medida se relacionan el coeficiente de almacenamiento, la precipitación media areal, la raíz del área, la longitud de cauce, el perímetro y el tiempo de concentración.

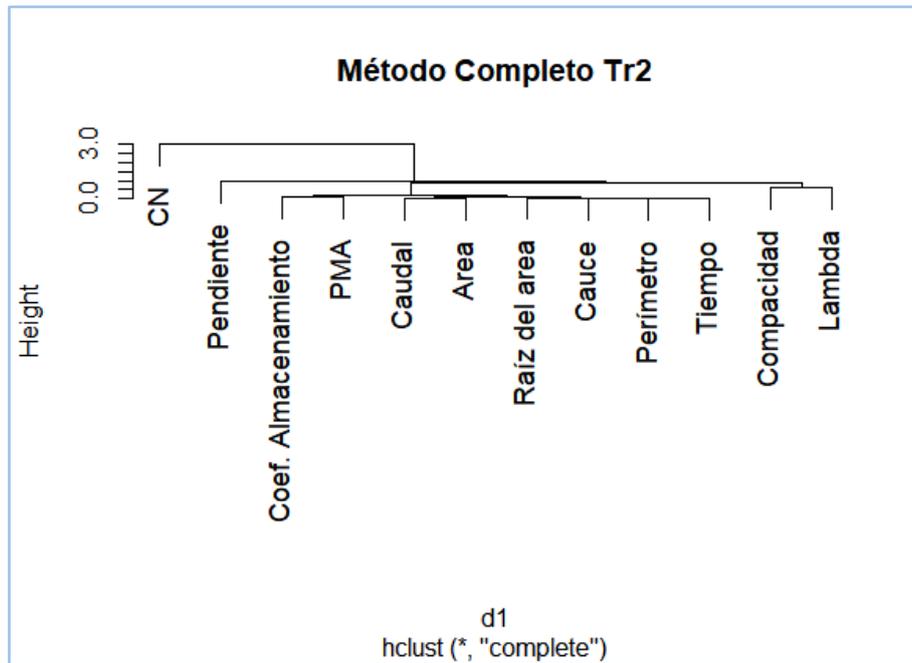


Figura 4.29. Método Completo o de distancias máximas – Recurrencia 2 Años.

Dado que los distintos métodos de Clusters muestran una gran similitud en las asociaciones entre variables, se seleccionó un solo método para analizar las demás recurrencias, el Método Completo.

4.11. Selección de Variables y Regionalización de Subcuencas

La evaluación de los sistemas hídricos involucra la elección y cuantificación de aquellas variables consideradas relevantes para su estudio y caracterización, por lo tanto, para realizar el agrupamiento de cuencas hidrológicamente homogéneas, previamente se seleccionaron las 5 variables más correlacionadas con el caudal o consideradas de mayor incidencia para la estimación de este, a partir de la interpretación de los resultados de los análisis estadísticos multivariados mencionados anteriormente.

Cabe aclarar que algunas variables están estrechamente relacionadas entre sí, como por ejemplo lo están el área y la raíz cuadrada del área, por el hecho de que surgen a partir de un mismo dato que se ve alterado a través de una operación aritmética, por lo que en estos casos se consideró conveniente

tomar una sola de estas variables, a fin de que las variables seleccionadas sean independientes.

Análogamente, sucede con el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento de Clark, los cuales dependen de la longitud de cauce y la pendiente. A su vez, el índice de compacidad se obtiene a partir del perímetro y el área.

Con el objetivo de corroborar la dependencia del tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento con la longitud de cauce, hemos calculado mediante el software RStudio los coeficientes de correlación entre estas variables en particular (Figura 4.30).

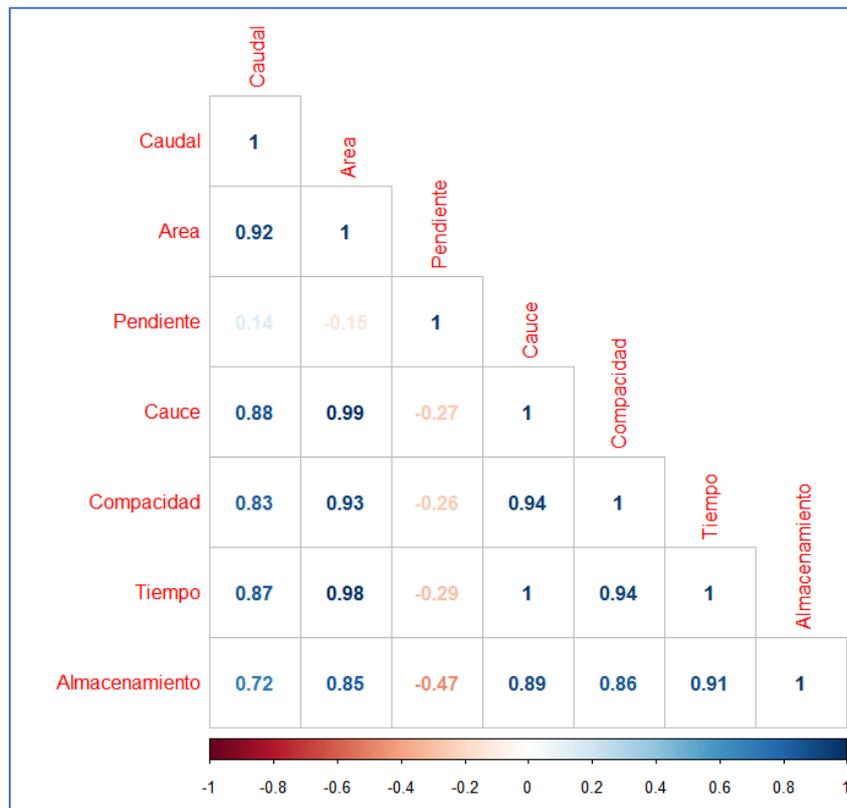


Figura 4.30. Correlación de Variables mayormente relacionadas con el Caudal.

A partir de los coeficientes de correlación calculados, se pudo confirmar cuantitativamente que el coeficiente de almacenamiento posee una alta dependencia de la longitud de cauce y del tiempo de concentración.

A su vez, el tiempo de concentración posee un 100% de dependencia de la longitud de cauce, por lo que el coeficiente de almacenamiento y el tiempo de concentración no fueron seleccionados dentro de las 5 variables.

Según los resultados extraídos, se destacaron como variables independientes mayormente relacionadas con el caudal al **área**, la **longitud de cauce** y la **pendiente**.

Por otro lado, la **precipitación media areal**, es otra variable que está directamente relacionada con el caudal. Tal como se mencionó en el apartado "4.1.1.7 Cálculo de Hietogramas para las subcuencas", esta variable depende de la duración y la recurrencia de la precipitación, afectada por un coeficiente de abatimiento que depende del área de la subcuenca.

Adicionalmente, el **Índice o Coeficiente de Compacidad**, a pesar de tener una correspondencia directa con el área, agrega la variable independiente del perímetro y como se mencionó en el apartado "3.1.1 Cuenca hidrográfica", caracteriza la forma de la cuenca.

Por lo mencionado anteriormente, las 5 variables elegidas fueron:

- *Área*
- *Longitud de Cauce*
- *Precipitación Media Areal*
- *Pendiente*
- *Índice de Compacidad*

A partir de la selección de las 5 variables, para realizar el agrupamiento de las cuencas hidrológicamente homogéneas, se eligieron dos métodos de identificación de grupos de entidades similares, **Análisis de Clusters** o de **Agrupamiento de Conglomerados** a través del gráfico de dendrogramas, utilizado anteriormente para correlacionar las variables, pero esta vez considerando solamente las 5 variables mencionadas, y los **Trazos Multidimensionales** o **Curvas de Andrews**, de modo de determinar y clasificar cuencas de comportamiento similar.

Previo a la aplicación de ambos métodos se generaron las matrices formadas por las 36 subcuencas y estas 5 variables por cada una de ellas y se realizó la estandarización de las variables.

La estandarización de variables, como se mencionó en el apartado "3.2.2.2 Analisis de componentes principales", consiste en restar a cada uno de los datos pertenecientes a una variable su media aritmética y dividirlo por la desviación estándar. Como resultado de realizar dicha operación con cada una de las variables, se obtiene que las variables poseen media 0 y desviación estándar 1.

También se le adjudicó un número a cada una de las subcuencas para facilitar la interpretación de los resultados de los dendrogramas, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.12. Numeración de Subcuencas.

Número	Subcuenca	Número	Subcuenca
1	C21-1_Arroyo Feliciano	19	2 Junction 1a
2	C9-1_Arroyo Banderas	20	2 Junction 1b
3	C4-1_Arroyo Estacas	21	3 Junction 2
4	C20-2_Arroyo Víboras	22	3 Junction 7
5	C20-1_Arroyo Sordo	23	3 Junction 15
6	C18-2_Arroyo Tases	24	4 Junction 16
7	C15-2_Arroyo Carpinchoni	25	4 Junction 4
8	C12-2_Arroyo Vizcachas	26	5 Junction 7
9	C12-1_Arroyo Estacas Este	27	6 Junction 9
10	C7-1_Arroyo de las Achiras	28	7 Junction 10
11	C18-1_Arroyo Atencio	29	8 Junction 11
12	C15-1_Arroyo Tuna	30	9 Junction 12
13	2 Junction 14	31	10 Junction 13
14	2 Junction 6	32	11 Junction 16
15	2 Junction 2	33	12 Paso Medina
16	2 Junction 9	34	13 Junction 17
17	2 Junction 12	35	14 Junction 21
18	2 Junction 11	36	15 Junction 22

Agrupamiento de Conglomerados

En primera instancia, para realizar el análisis de clusters, se determinó la cantidad óptima de grupos o regiones, para la recurrencia correspondiente a 2 años. La misma se llevó a cabo a través del algoritmo K-Means, en el software RStudio (Figura 4.31).

K-Means es un algoritmo de optimización cuyo objetivo es minimizar la suma de distancias cuadráticas de cada observación al centroide de su clúster, para un número de clusters adoptado, este valor es también conocido como inercia.

En el eje de ordenadas se representa el valor de la inercia (Gap Statistic) para un determinado Número de Cluster, observado en las abscisas.

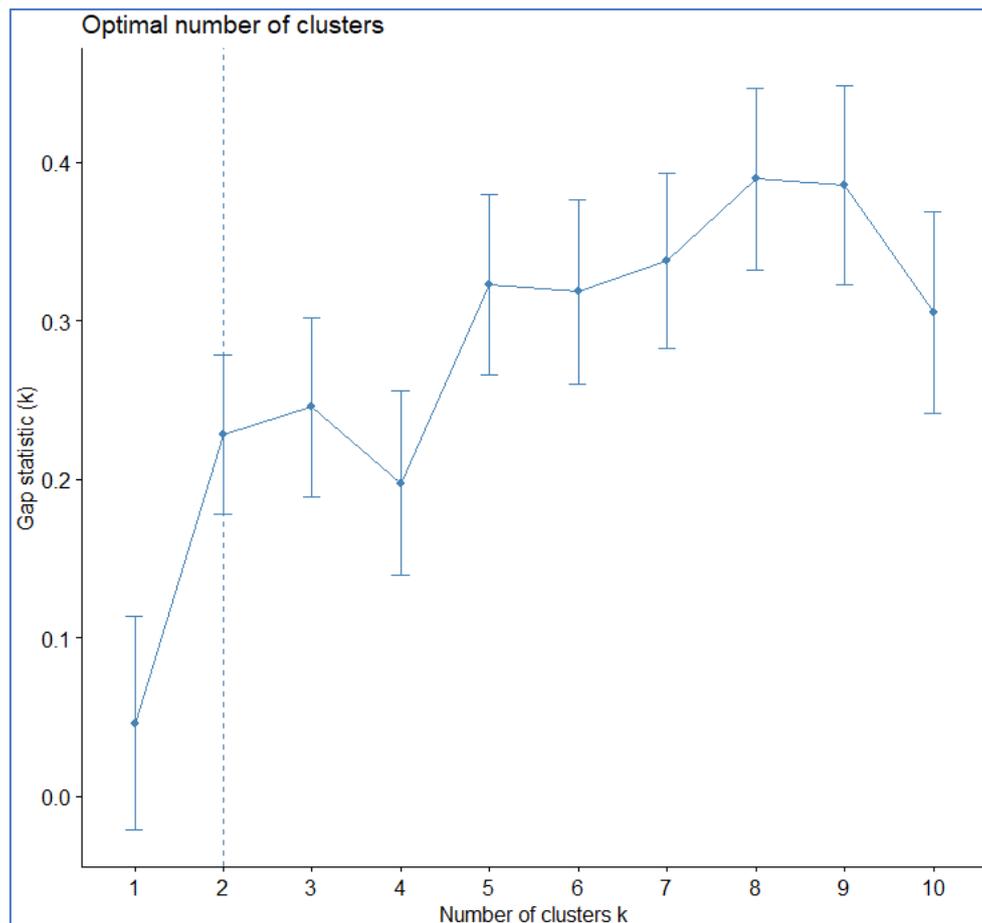


Figura 4.31. Número Óptimo de Clusters – Recurrencia 2 Años.

Al trazar líneas rectas que pasen por los valores de inercia obtenidos se observan diferentes cambios de pendiente. El punto en el cual se observa un

cambio brusco en la inercia indica el número óptimo de clusters para el grupo de datos.

A través del algoritmo se determinó la presencia de dos grandes grupos definidos entre las 36 subcuencas.

Una vez obtenido el valor del número de clusters recomendado se graficó el dendrograma en RStudio, ordenando que sea agrupado en dos regiones (Figura 4.32).

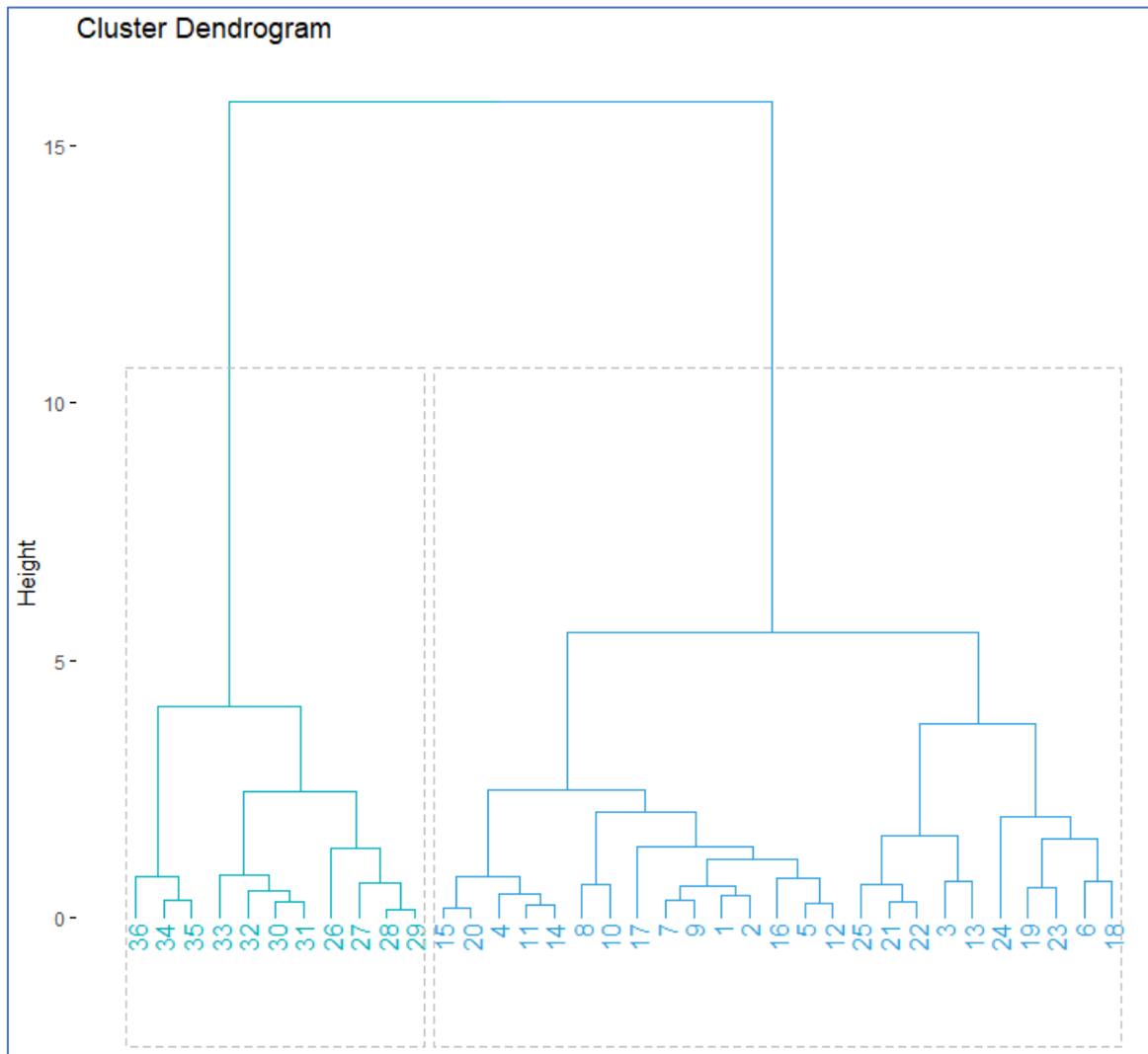


Figura 4.32. Dendrograma – 2 Regiones – Recurrencia 2 Años.

A partir del gráfico de clusters por el método completo se observan los dos grandes grupos, la Región 1, conformada por las subcuencas N. °26 hasta la N. °36, es decir que está compuesto por las subcuencas de mayor área, desde

las subcuencas pertenecientes al Quinto Orden hasta la de Quinceavo Orden y la Región 2, compuesta por la subcuenca N. °1 hasta la N. °25, es decir que forman parte de este grupo las subcuencas pequeñas de Primer Orden hasta las subcuencas de Cuarto Orden.

La regionalización de subcuencas en solo dos grandes grupos fue considerada excesivamente generalizada para subcuencas con valores de variables muy diversos, de igual modo, se procedió al gráfico de las Curvas de Andrews para evaluar la homogeneidad de cada región.

Para la determinación de las funciones sinusoidales que describen las curvas de Andrews es necesario establecer un orden de mayor a menor importancia entre las variables, ya que la influencia de los términos dentro la función va desde el de mayor predominio (X_1) hasta el menor (X_5).

$$f(x) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \text{sen}(t) + X_3 \text{cos}(t) + X_4 \text{sen}(2t) + X_5 \text{cos}(2t)$$

El orden de las 5 variables elegidas fue:

X_1 = Área

X_2 = Longitud de Cauce

X_3 = Precipitación Media Areal

X_4 = Pendiente

X_5 = Índice de Compacidad

Posteriormente se graficaron ambas regiones (Figura 4.33 y 4.34).

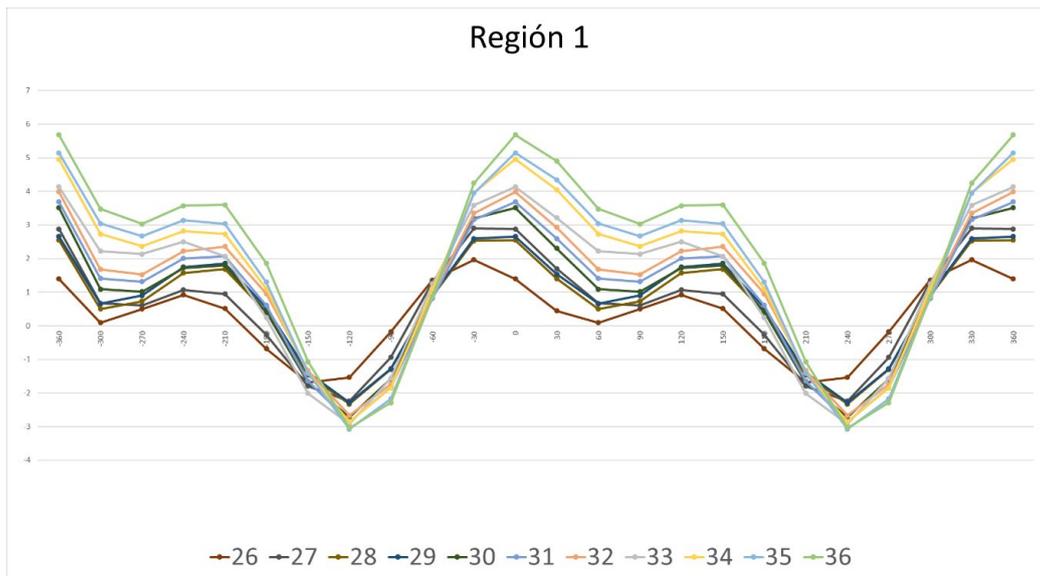


Figura 4.33. Curvas de Andrews – Regionalización en 2 Grupos – Región 1
Recurrencia 2 Años.

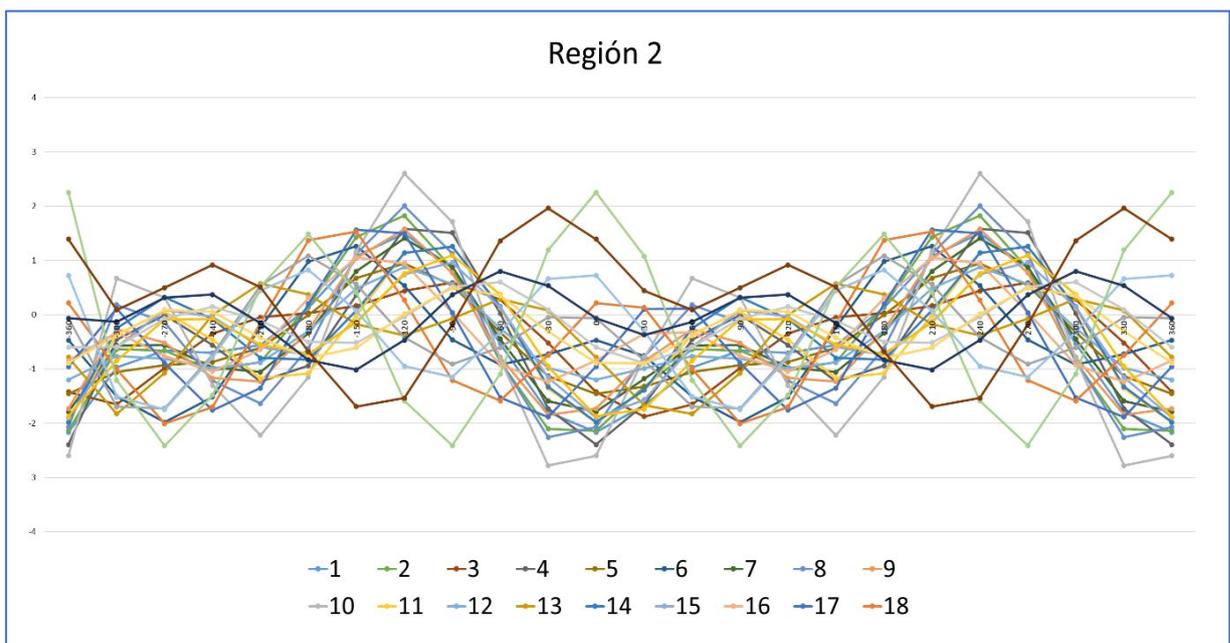


Figura 4.34. Curvas de Andrews – Regionalización en 2 Grupos – Región 2
Recurrencia 2 Años.

Se puede observar en la Figura 4.32, que las subcuencas pertenecientes a la Región 1, integrada por las subcuencas de mayor tamaño poseen un comportamiento similar de variables que se ve reflejado en la semejanza de las curvas. En caso contrario, en la Figura 4.33, se observa que la Región 2 no es

homogénea, sino que las variables de las subcuencas que la componen presentan distintas características.

La homogeneidad de las regiones es un factor fundamental en la calidad de la estimación de caudales, ya que, del comportamiento de las variables de una misma región, depende la capacidad de ajuste de la fórmula de estimación. A fin de lograr menores errores de estimación, se decidió realizar la regionalización en 3 grupos.

En la **Figura 4.35** se graficó nuevamente el dendrograma a través del método completo, esta vez segmentándolo en 3 regiones.

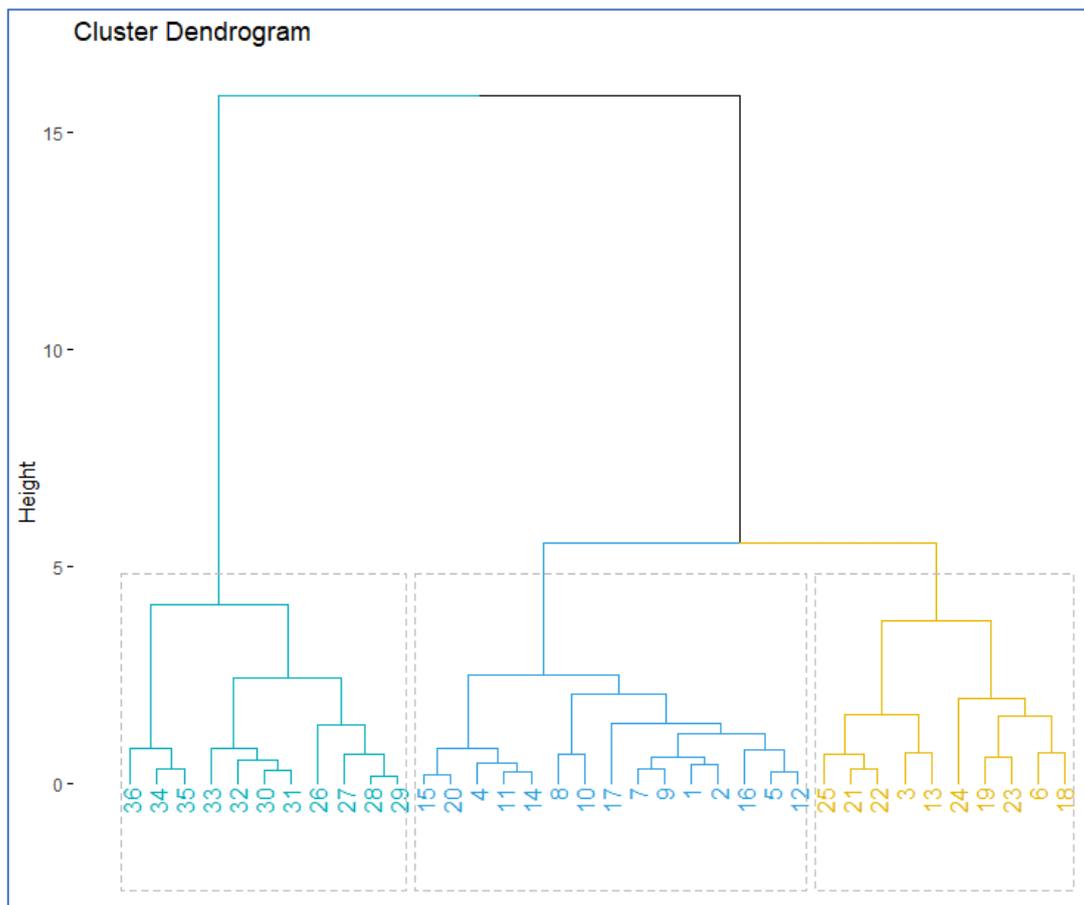


Figura 4.35. Dendrograma – 3 Regiones – Recurrencia 2 Años.

Se puede observar que la anteriormente llamada Región 2, cuyas curvas presentaron características morfológicas diferentes, fue subdividida en dos grupos, mientras que la Región 1 que presentaba curvas similares mantuvo su composición.

Luego, se graficaron nuevamente las curvas de Andrews para analizar la homogeneidad de los nuevos agrupamientos (Figura 4.36 y 4.37).

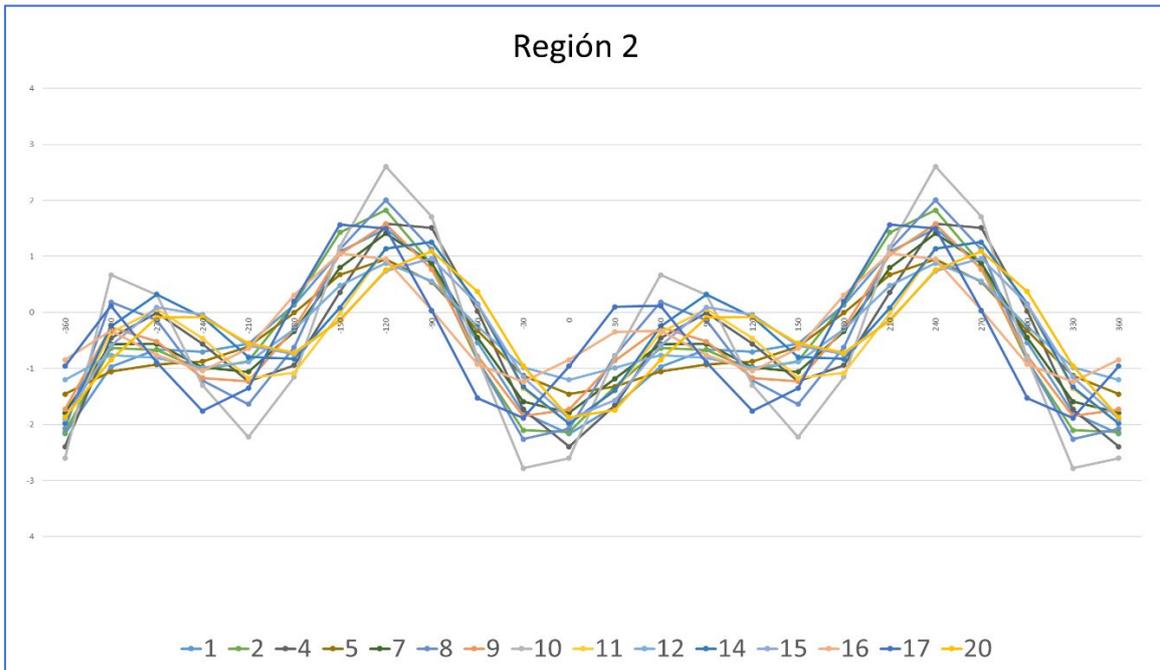


Figura 4.36. Curvas de Andrews – Regionalización en 3 Grupos – Región 2
Recurrencia 2 Años.

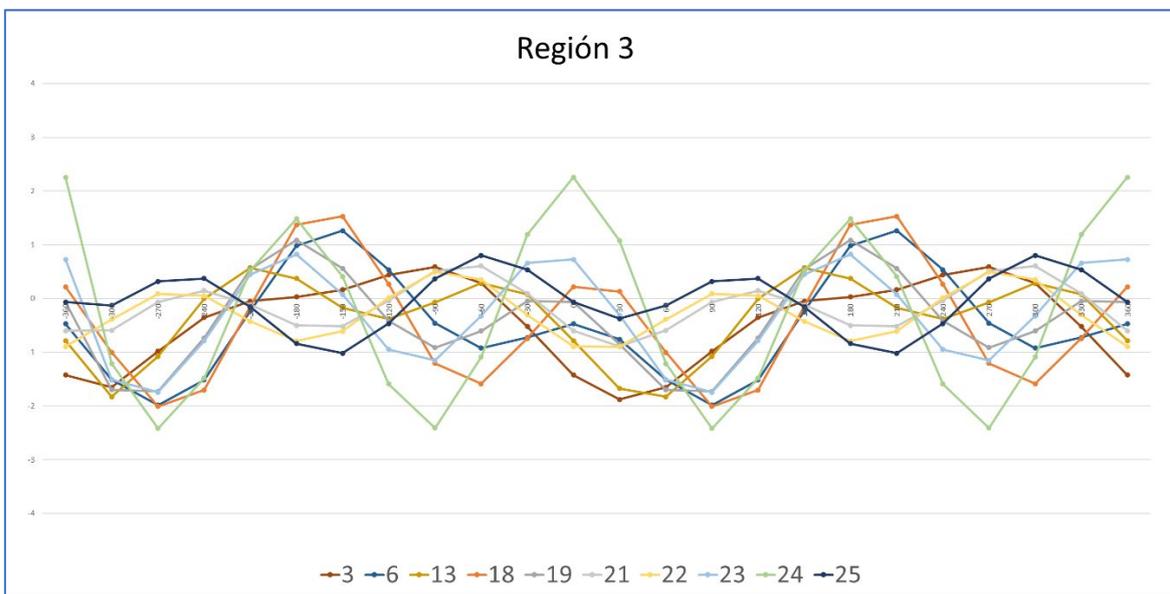


Figura 4.37. Curvas de Andrews – Regionalización en 3 Grupos – Región 3
Recurrencia 2 Años.

A partir de las nuevas conglomeraciones se observó que las subcuencas pertenecientes a la Región 2 presentaron morfologías de curvas similares,

mientras que la Región 3 continuó presentando algunas discrepancias entre las curvas. Por este motivo se decidió subdividir la Región 3 en dos nuevas regiones.

A partir del damerograma de la **Figura 4.37**, se decidió por dividir la Región 3 en dos nuevas regiones, una integrada por las subcuencas 25, 21, 22, 3 y 13 y la otra por las subcuencas 24, 19, 23, 6 y 18.

De esta manera se graficaron nuevamente las Curvas de Andrews, en este caso llevando a cabo la regionalización de las subcuencas en las **4 Regiones hidrológicamente homogéneas definitivas**. Integradas de la siguiente manera (**Figuras 4.38, 4.39, 4.40 y 4.41**).

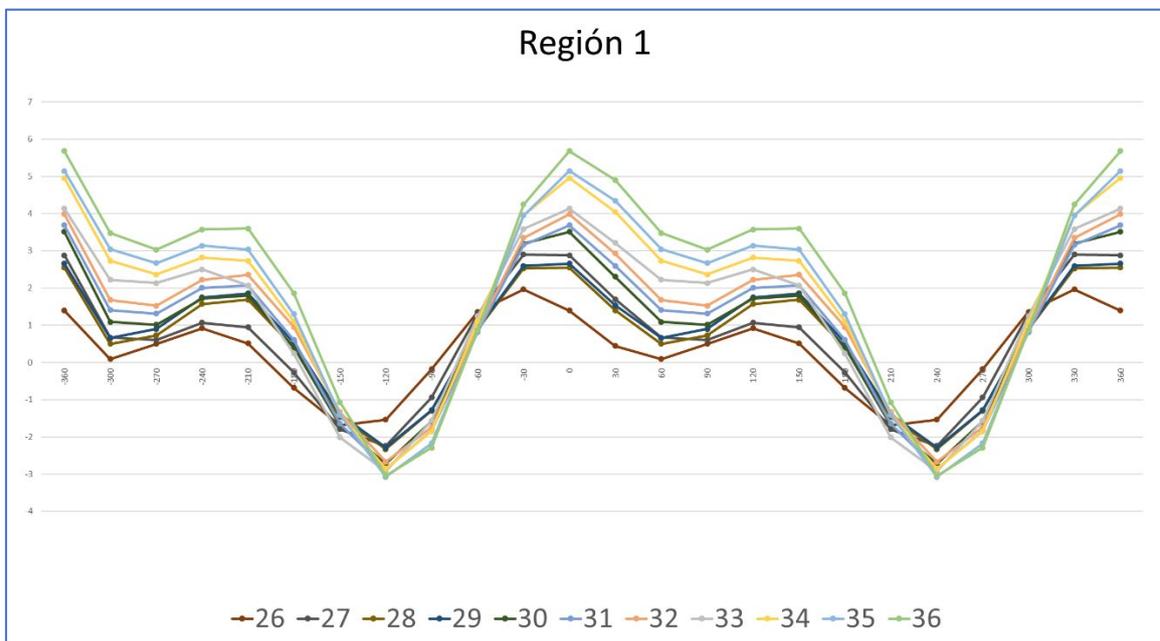


Figura 4.38. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 1 - Recurrencia 2 Años.

Como se mencionó anteriormente, esta región está integrada por subcuencas del quinto al quinceavo orden, abarcando **Áreas mayores a los 2000 km²**.

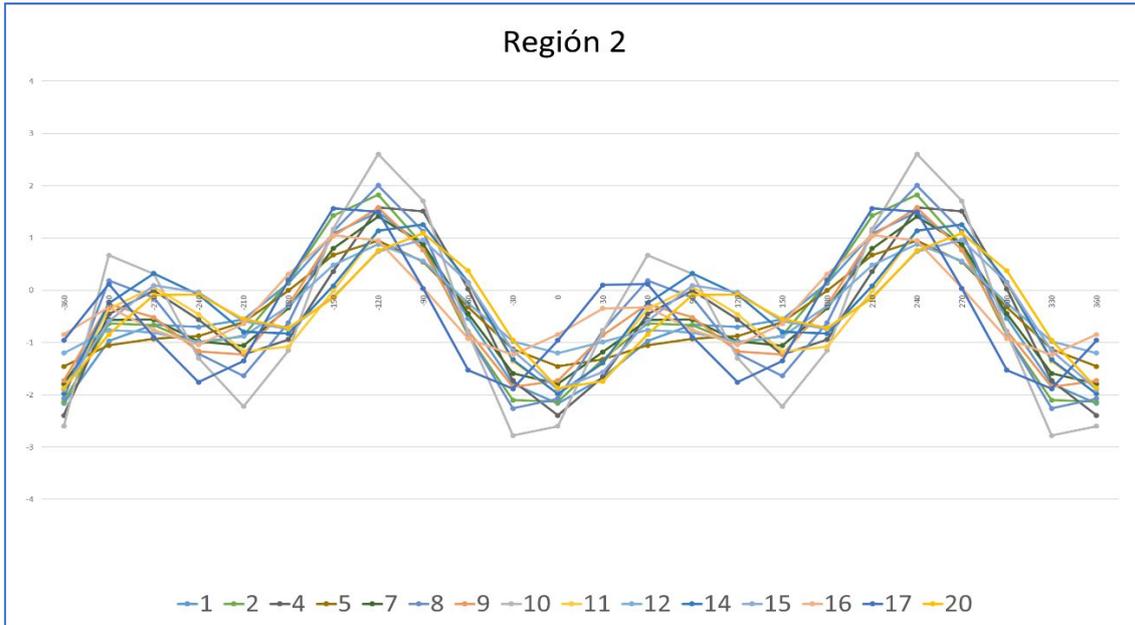


Figura 4.39. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 2 – Recurrencia 2 Años.

La región 2 está conformada por la totalidad de subcuencas de primer orden, exceptuando las subcuencas de Arroyo Tases (Región 4) y Arroyo Estacas (Región 3) y las subcuencas 14, 15, 16, 17 y 20, de segundo orden.

La región 2 está conformada por subcuencas de primer y segundo orden, las cuales poseen Áreas menores a 2000 km² y un Índice de Compacidad mayor a 1.45.

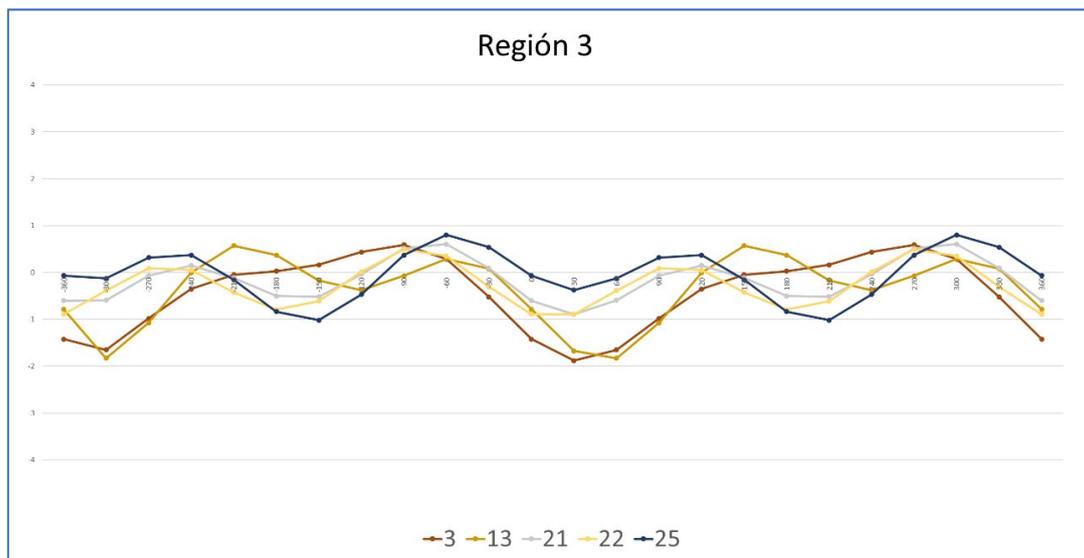


Figura 4.40. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 3 - Recurrencia 2 Años.

La región 3 a pesar de ser un agrupamiento de subcuencas de similar comportamiento, es muy variado en cuanto a los órdenes de las subcuencas que la componen, ya que está compuesta por la subcuenca 3 (Arroyo Estacas) de primer orden, la 13 de segundo orden, la 21 y 22 de tercer orden y la 25 de cuarto orden.

En cuanto a sus características físicas, Áreas menores a 2000 **km²** y un Índice de Compacidad menor a 1.45 y pendiente menor a 0.00045.

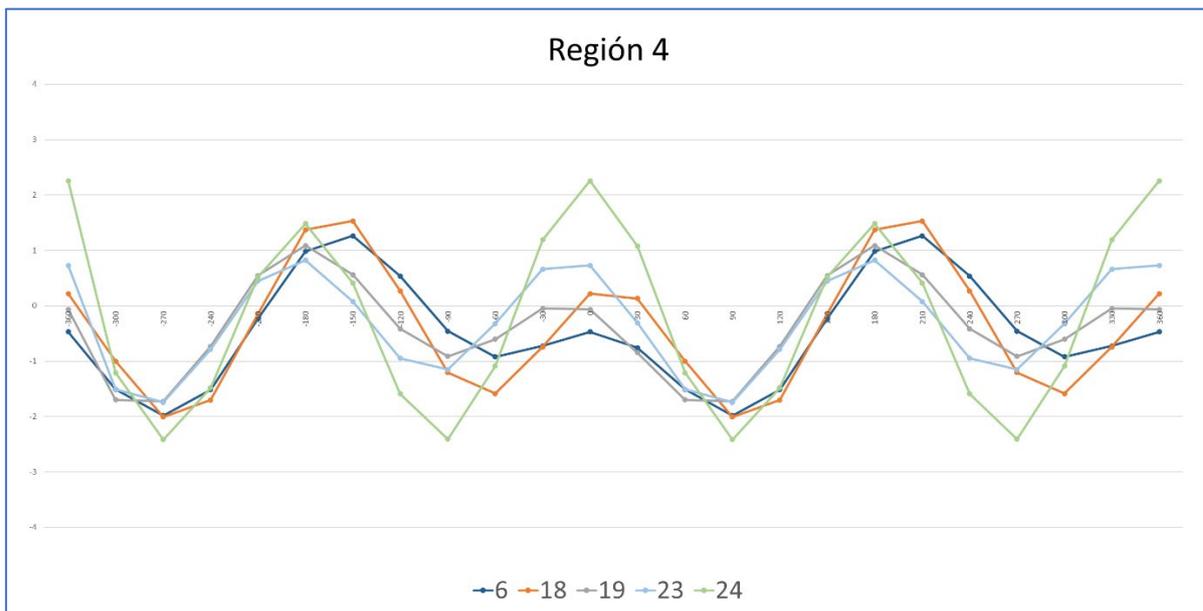


Figura 4.41. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 4 - Recurrencia 2 Años.

Al igual que la región 3, la región 4 posee subcuencas de órdenes variados, la subcuenca 6 (Arroyo Tases) de primer orden, la 18 y 19 de segundo orden, la 23 de tercer orden y la 24 de cuarto orden.

En cuanto a sus características físicas, Áreas menores a 2000 **km²** y un Índice de Compacidad menor a 1.45 y pendiente mayor a 0.00045.

De esta manera, a partir del agrupamiento de subcuencas obtenido en los dendrogramas y su posterior representación gráfica en las curvas de Andrews se dividieron las 36 subcuencas analizadas en 4 regiones de similar comportamiento hidrológico, dentro de las cuales es válido transferir información.

El agrupamiento de conglomerados y las curvas también se graficaron para las recurrencias de 5, 10, 20, 50 y 100 años. Teniendo en cuenta que la única de las 5 variables analizadas que modifica su magnitud en función de la recurrencia es la Precipitación Media Areal, los resultados obtenidos en las demás recurrencias presentan una idéntica disposición.

4.12. Ecuación Regional de Caudales

Para cada una de las 4 regiones determinadas a través el Agrupamiento de Conglomerados y las Curvas de Andrews se propuso deducir una ecuación de estimación de caudales a través de regresión lineal múltiple, para una recurrencia de 2 años.

Para ello, se eligieron las tres variables consideradas como las más representativas y de mayor incidencia en función del caudal máximo para una determinada recurrencia, estas fueron:

- Área (*A*)
- Pendiente (*P*)
- Precipitación Media Areal (*PMA*)

Para mejorar el ajuste de las ecuaciones, se decidió trabajar con el logaritmo natural de las variables, por lo que las fórmulas de estimación a deducir fueron conformadas de la siguiente manera:

$$\ln(Q_{2\text{años}}) = X_0 + X_1 * \ln(A) + X_2 * \ln(P) + X_3 * \ln(PMA_{2\text{años}})$$

De modo que el caudal máximo para una recurrencia de 2 años ($Q_{2\text{años}}$) se calcula:

$$Q_{2\text{años}} = e^{(X_0 + X_1 * \ln(A) + X_2 * \ln(P) + X_3 * \ln(PMA_{2\text{años}}))}$$

En la *Guía de Aplicación del Método de Estimación de Caudales* se encuentra el procedimiento completo de aplicación del método de estimación de caudales máximos correspondientes a 2 años de recurrencia.

En post de hallar el valor de los coeficientes X_0, X_1, X_2 y X_3 se utilizó nuevamente el software RStudio, el cual arrojó la siguiente ecuación para la **Región 1**, con una capacidad de ajuste del 90,29%.

ECUACIÓN REGIONAL DE CAUDALES – REGIÓN 1 – RECURRENCIA: 2 AÑOS

$$\ln(Q_2) = 11.719 + 0.622 \ln(A) + 1.144 \ln(P) - 0.127 \ln(PMA_2)$$

En cuanto a la estimación de caudales para las recurrencias de 5, 10, 20, 50 y 100 años se llevó a cabo a mediante la utilización de Índices de Creciente.

Para obtener los Índices de Creciente (**IC**) se debe hallar previamente la **Ecuación Regional de Frecuencia** para cada una de las 4 regiones, la secuencia de cálculo para la determinación de la ecuación perteneciente a la Región 1 se presenta a continuación:

En una primera instancia se calcularon las relaciones de los caudales máximos de las distintas recurrencias con el caudal de 2 años de recurrencia (**Tabla 4.13**).

Tabla 4.13. Relaciones de Caudales máximos – Región 1.

ÍNDICE DE CRECIENTE= QR/Q2					
Subcuenca	Q5/Q2	Q10/Q2	Q20/Q2	Q50/Q2	Q100/Q2
5 Junction 7	1,52	1,89	2,26	2,92	3,40
6 Junction 9	1,54	1,92	2,27	2,91	3,38
7 Junction 10	1,54	1,94	2,35	2,94	3,44
8 Junction 11	1,59	1,99	2,41	3,01	3,51
9 Junction 12	1,63	2,02	2,45	3,03	3,52
10 Junction 13	1,59	2,00	2,42	3,01	3,52
11 Junction 16	1,62	2,05	2,49	3,10	3,63
12 Paso Medina	1,60	2,00	2,44	3,01	3,53
13 Junction 17	1,52	1,91	2,38	2,99	3,52
14 Junction 21	1,50	1,90	2,35	2,95	3,46
15 Junction 22	1,46	1,82	2,24	2,79	3,25

Luego se calculó el promedio de las relaciones de caudales para cada recurrencia (tabla 4.14), se graficaron los puntos y se obtuvo la ecuación regional de frecuencia a través de una línea de tendencia logarítmica (Figura 4.42).

Tabla 4.14 Promedio de Relaciones de Caudales máximos – Región 1

RECURRENCIA	5	10	20	50	100
(QR/Q2) Promedio	1,56	1,95	2,37	2,97	3,47

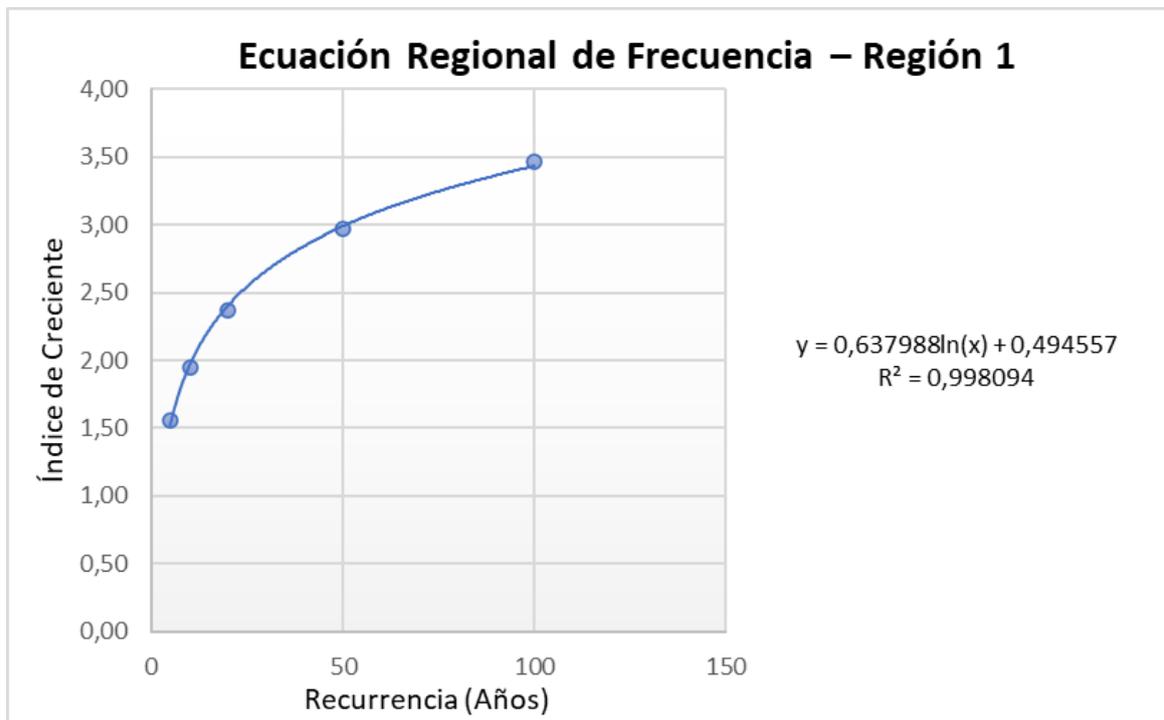


Figura 4.42. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 1.

$$IC(R1) = 0.638 \ln(Tr) + 0.495$$

La Ecuación Regional de Frecuencia permite calcular Índices de Creciente para estimar caudales no solo para las 6 recurrencias definidas en este trabajo de investigación, sino que también permite la posibilidad de estimar un caudal para cualquier periodo de retorno intermedio que se desee según las características de la obra para la que se estime su caudal de diseño. Por ejemplo,

si se desea calcular el Índice de Creciente de una subcuenca perteneciente a la Región 1, para una recurrencia de 25 años, se debe llevar a cabo el cálculo de la siguiente manera:

$$IC(R1) = 0.638 + 0.495 = 2.55$$

De esta manera el caudal estimado para la recurrencia elegida resulta:

$$Q_{25\text{años}}(R1) = 2.55 * Q_{2\text{años}}$$

Análogamente se hallaron las ecuaciones regionales de caudales y de frecuencia para las regiones 2,3 y 4 (Figuras 4.43, 4.44 y 4.45).

ECUACIÓN REGIONAL DE CAUDALES – REGIÓN 2 – RECURRENCIA: 2 AÑOS

$$\ln(Q_2) = -0.701 + 0.666 \ln(A) - 0.054 \ln(P) + 0.251 \ln(PMA_2)$$

Capacidad de Ajuste: 80,73%.

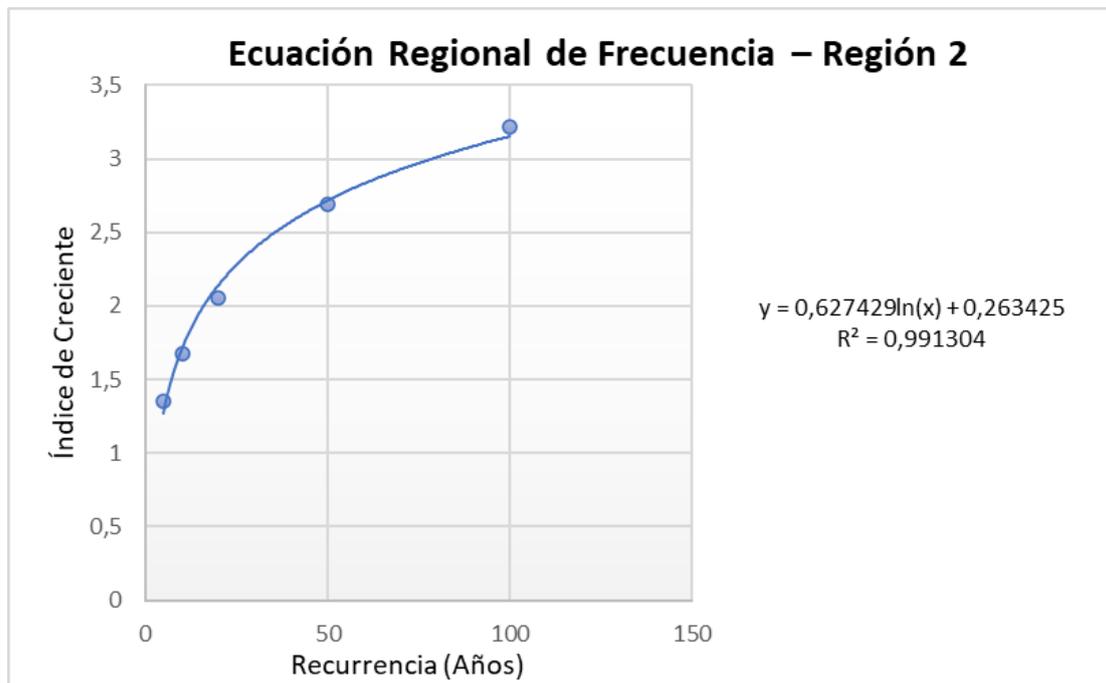


Figura 4.43. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 2.

$$IC(R2) = 0.627 \ln(Tr) + 0.263$$

ECUACIÓN REGIONAL DE CAUDALES – REGIÓN 3 – RECURRENCIA: 2 AÑOS

$$\ln(Q_2) = 5.622 + 0.827 \ln(A) - 0.758 \ln(P) - 2.320 \ln(PMA_2)$$

Capacidad de Ajuste: 99.99 %.

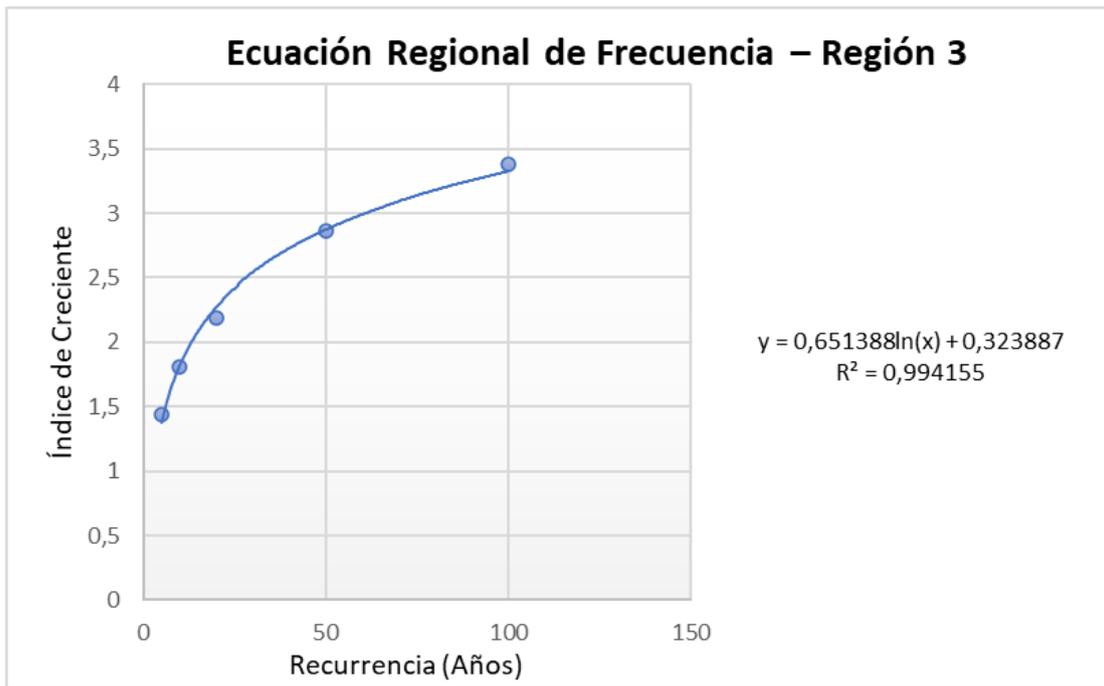


Figura 4.44. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 3.

$$IC(R3) = 0.651 \ln(Tr) + 0.324$$

ECUACIÓN REGIONAL DE CAUDALES – REGIÓN 4 – RECURRENCIA: 2 AÑOS

$$\ln(Q_2) = 2.487 + 0.768 \ln(A) - 0.135 \ln(P) - 0.584 \ln(PMA_2)$$

Capacidad de Ajuste: 93.5 %.

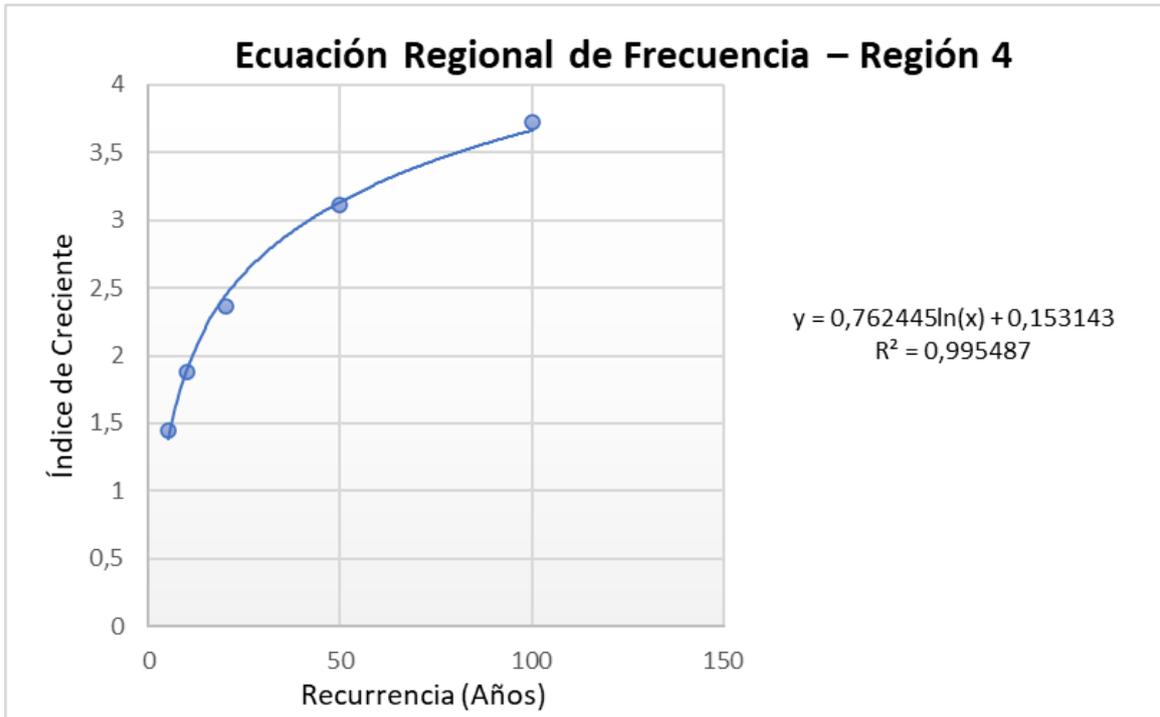


Figura 4.45. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 4.

$$IC(R4) = 0.762 \ln(Tr) + 0.153$$

5. Cuenca del río Gualeguaychú

5.1. Recopilación y Análisis de Datos

La búsqueda y obtención de datos de la cuenca marcó el inicio del trabajo. En primer lugar, se extrajeron datos de aforos, caudales instantáneos y alturas, de los registros que se encuentran en la página web de la Red Hidrológica Nacional y que pertenecen a los cauces de la cuenca. Además, se pudo contar con un modelo hidrológico completo perteneciente a un estudio anterior de la cuenca (Sato, 2016) el cual ya se encontraba calibrado y validado. Respecto al mismo se mencionan algunas características a continuación:

- Utiliza el método del CN para la obtención de la precipitación efectiva.
- La transformación lluvia-caudal se hace mediante el método del hidrograma unitario de Clark.
- El tránsito y la atenuación del hidrograma a través de los cauces se tiene en cuenta a través del método de Muskingum-Cunge.
- La cuenca se encuentra modelada en el software HEC-HMS perteneciente al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.
- La cuenca se encuentra dividida, a su vez, en 42 subcuencas que encierran las distintas redes de arroyos de la zona (figura 5.1).

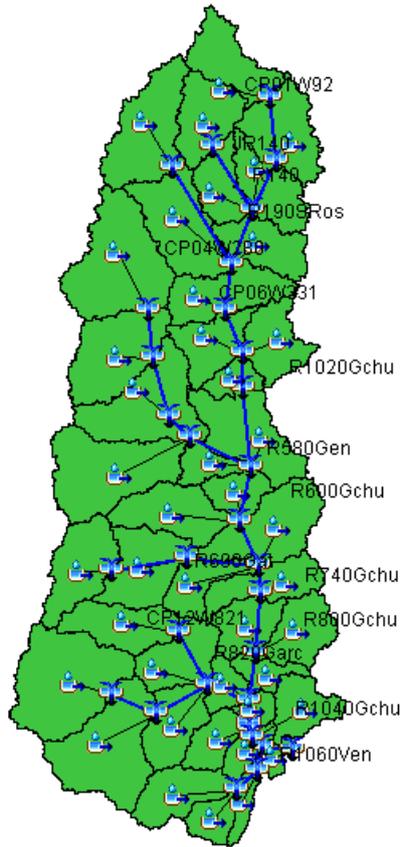


Figura 5.1. Modelo Hidrológico de la cuenca del río Gualeguaychú.

Volviendo a la compilación de datos, de acuerdo con la página web de la Red Hidrológica Nacional, dentro de los límites de la cuenca del río Gualeguaychú se encuentran cuatro estaciones en las que se llevan a cabo registros de caudales:

- Estación Ruta Nacional N° 130
- Estación Ruta Provincial N° 39
- Estación Ruta Nacional N° 14
- Estación Ruta Nacional N° 136

De las cuatro estaciones, solamente la que se encuentra en Ruta Provincial N°39 tiene un registro lo suficientemente extenso como para utilizar sus registros en un análisis estadístico. A partir de las series de valores de Caudales Máximos Instantáneos de la estación, se extrajeron los máximos anuales con los que se formó la serie de Caudales Máximos Diarios Anuales (tabla 5.1). La misma quedó constituida con datos del período 1989-2018.

<i>Estación: RUTA PROVINCIAL N° 039</i>		
<i>Parámetro: $Q_{Máx. Anual}$</i>		
Año Hidrológico		Caudal (m^3/s)
1989	1990	265,78
1991	1992	0,96
1992	1993	391,20
1993	1994	301,23
1994	1995	86,51
1995	1996	176,22
1996	1997	6,75
1997	1998	376,30
1998	1999	426,95
1999	2000	630,94
2000	2001	319,20
2001	2002	319,20
2002	2003	585,20
2003	2004	150,41
2004	2005	536,09
2005	2006	143,96
2006	2007	316,84
2007	2008	272,30
2008	2009	154,42
2009	2010	449,89
2010	2011	63,28
2011	2012	239,96
2012	2013	239,96
2013	2014	127,33
2014	2015	287,38
2016	2017	253,45
2017	2018	377,02

Tabla 5.1. Serie de Caudales Máximos Diarios Anuales.

Haciendo uso del software estadístico wxAFMulti se realizó un análisis de frecuencias con la serie de Caudales Máximos Diarios Anuales a través de siete funciones de distribución con las que el software trabaja:

Para cada una de ellas se obtuvieron los valores de la variable estudiada para distintas probabilidades y la bondad de ajuste. En este caso, la variable estudiada era el caudal Q , y se obtuvieron los valores para las probabilidades que corresponden a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. A continuación, se muestran los resultados numéricos y las salidas gráficas del software en que pueden apreciarse la aproximación que presentan las distintas funciones de distribución frente a los datos de entrada o frecuencia experimental (figura 5.2

y tabla 5.2) y la bondad de ajuste en base al cálculo de errores (figura 5.3y tabla 5.3):

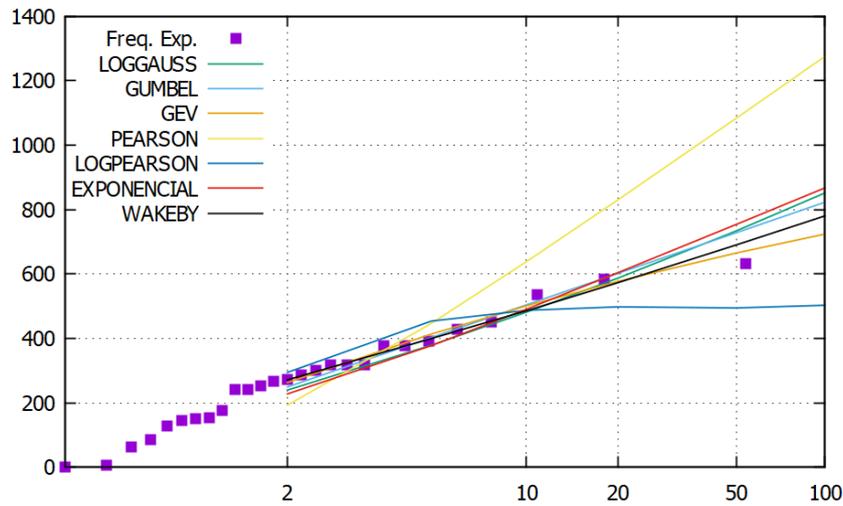


Figura 5.2. Gráfico de Distribuciones.

VALORES DE LA VARIABLE PARA DISTINTAS PROBABILIDADES							
RECURRENCIA (años)	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOGPEARSON	EXPONENCIAL	WAKEBY
100	851,1	822,4	723,7	1274,9	502,6	866,9	780,0
50	733,5	727,8	664,8	1083,2	494,5	753,6	689,9
20	586,9	601,7	576,9	829,8	497,8	603,9	572,8
10	481,4	504,2	500,9	638,1	486,9	490,6	485,8
5	378,8	402,6	413,3	446,4	453,6	377,3	399,5
2	239,4	249,2	262,7	192,9	294,4	227,6	271,3

Tabla 5.2 – Valores de la variable Q para distintas recurrencias.

ESTUDIO ESTADISTICO DE: Río Gualeguaychú
 ESTACION: Ruta Provincial N°39 - SERIE: Caud

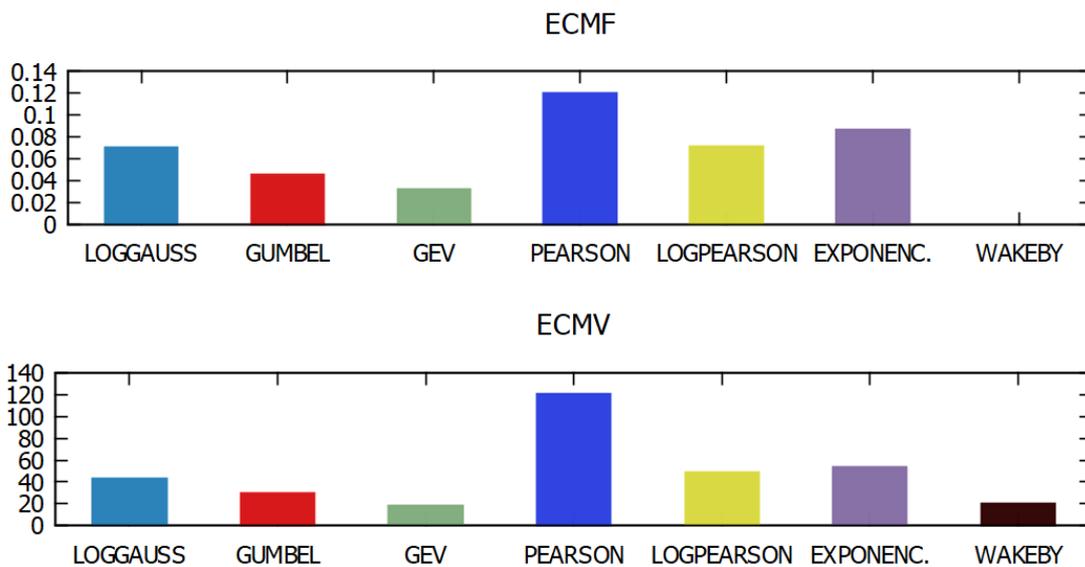


Figura 5.3. Gráfico de Bondad de Ajuste de las Funciones de Distribución.

BONDAD DE AJUSTE							
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	LOGPEARSON	EXPONENCIAL	WAKEBY
KOLMOGOROFF:	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	AAA	---
CHI-CUADRADO:	---	---	---	---	---	---	---
ECMF:	0,0711	0,0454	0,0319	0,1206	0,0712	0,0871	0,0000
ECMV:	43,37	29,69	18,90	120,99	49,09	53,98	20,13

Tabla 5.3. Bondad de Ajuste de las Funciones de Distribución.

A partir de los resultados relativos a los errores, la función con mejor aproximación resultó ser la GEV, adoptándose esta función para posteriormente comparar los valores de caudales obtenidos en el modelo hidrológico de la cuenca.

5.2. Análisis de distribución de la Precipitación

Como se mencionó, para el análisis de la cuenca y la obtención de los caudales, se contaba con un modelo hidrológico de la cuenca del Río Gualeguaychú ya generado y calibrado (Sato, 2016). Por lo que el dato que se requería para la obtención de los caudales era obtener precipitaciones asociadas a distintas recurrencias que produjeran caudales de la misma recurrencia al ingresarlas al modelo.

Para ello, se contó con las curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (Curvas IDF) para cuencas de distinto tamaño dentro de la cuenca del río Gualeguaychú, obtenidas como resultado en un proyecto de investigación referido a esta temática (Lopez et al., 2020). A partir de los resultados de este estudio se obtuvieron intensidades de precipitación relacionadas a distintas recurrencias y distintas duraciones de tormenta, para varias subcuencas del Río Gualeguaychú.

En un primer análisis, se utilizaron las curvas IDF (figura 5.4) y la tabla con los coeficientes para las distintas recurrencias (tabla 5.4) pertenecientes a la subcuenca coincidente con la estación de aforo en Ruta Provincial N°39, dentro de la cuenca del Gualeguaychú.

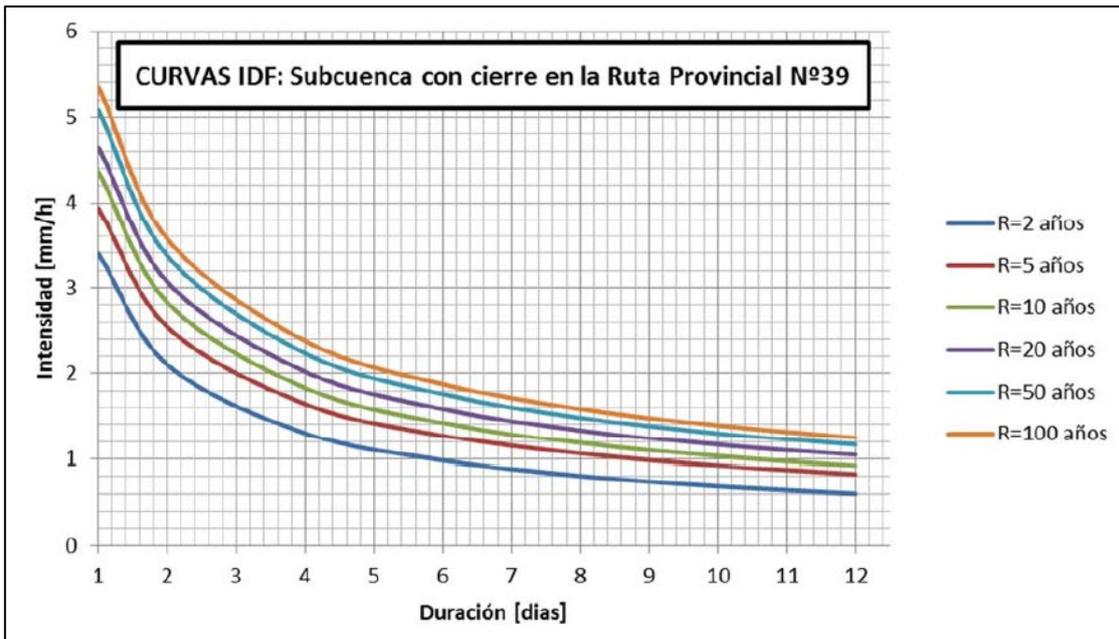


Figura 5.4. Curvas IDF de subcuenca con cierre en Ruta Provincial N°39.

INTENSIDAD (mm/h)		Recurrencia (Años)						
Duración	t (hs)	t (min)	2	5	10	20	50	100
	24	1440	3,4	3,9	4,3	4,6	5,0	5,3
	48	2880	2,1	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5
	96	5760	1,3	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
	144	8640	1,0	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9
	192	11520	0,8	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
	240	14400	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4
	288	17280	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
COEFICIENTES CURVAS IDF		A	525,01	384,20	417,27	367,80	379,46	380,01
		B	1,553	1,559	1,553	1,559	1,559	1,553
		C	0,693	0,630	0,627	0,601	0,593	0,586

Tabla 5.4. Coeficientes para las Curvas IDF de subcuenca con cierre en Ruta N°39.

Adoptando las duraciones de precipitación de 4, 6, 8 y 10 días, junto con las intensidades obtenidas de las curvas IDF, se obtuvieron las precipitaciones medias areales (PMA) de cada recurrencia a utilizar en el modelo (tabla 5.5).

RECURRENCIA (años)	Duración (días)	Duración (hs)	Intensidad (mm/h)	PMA (mm)
100	4	96	2,377	228,24
	6	144	1,875	269,97
	8	192	1,584	304,12
	10	240	1,390	333,56
50	4	96	2,234	214,50
	6	144	1,757	253,01
	8	192	1,481	284,44
	10	240	1,298	311,49
20	4	96	2,021	194,00
	6	144	1,584	228,08
	8	192	1,332	255,83
	10	240	1,165	279,65
10	4	96	1,830	175,72
	6	144	1,420	204,43
	8	192	1,185	227,59
	10	240	1,031	247,35
5	4	96	1,642	157,65
	6	144	1,272	183,18
	8	192	1,061	203,75
	10	240	0,922	221,29
2	4	96	1,301	124,85
	6	144	0,982	141,41
	8	192	0,805	154,47
	10	240	0,689	165,43

Tabla 5.5. Precipitación Media Areal.

Una vez obtenida la precipitación media areal, faltaba establecer la distribución temporal de la misma. Para ello se evaluaron dos alternativas: por un lado, la distribución mediante hietogramas de bloques alternos y por el otro utilizando una distribución por patrones temporales.

Con el objeto de hacer uso de la información disponible de estudios existentes y también con el objeto de intentar la implementación de unos patrones temporales que puedan ser válidos para toda la provincia de Entre Ríos, se utilizaron los resultados de un estudio de tormentas de diseño realizado en la provincia (Zamanillo et al., 2008).

En dicho estudio se obtuvieron patrones de distribución temporal de las precipitaciones en las localidades de Paraná, Concepción del Uruguay y Concordia (figuras 5.5, 5.6 y 5.7). Con el objetivo de lograr lo antes mencionado se calculó un hietograma de patrones temporales de distribución común para

toda la provincia, realizando un promedio ponderado entre los tres hietogramas (figura 5.8).

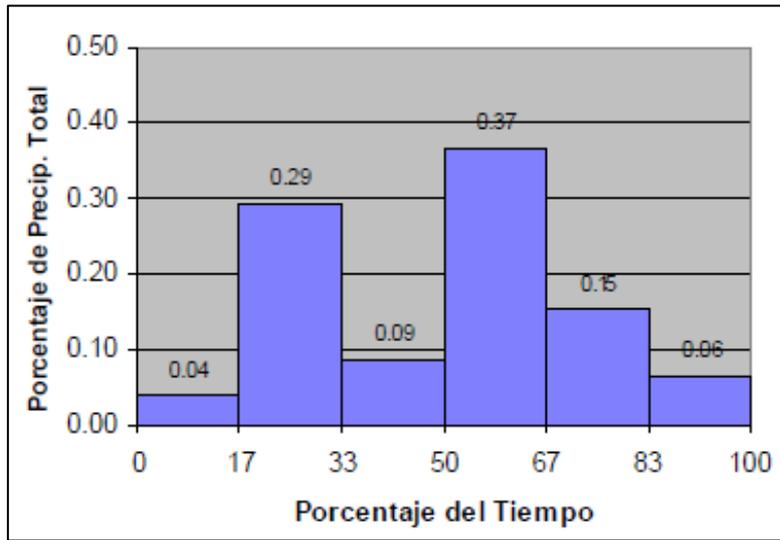


Figura 5.5 . Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Concepción del Uruguay.

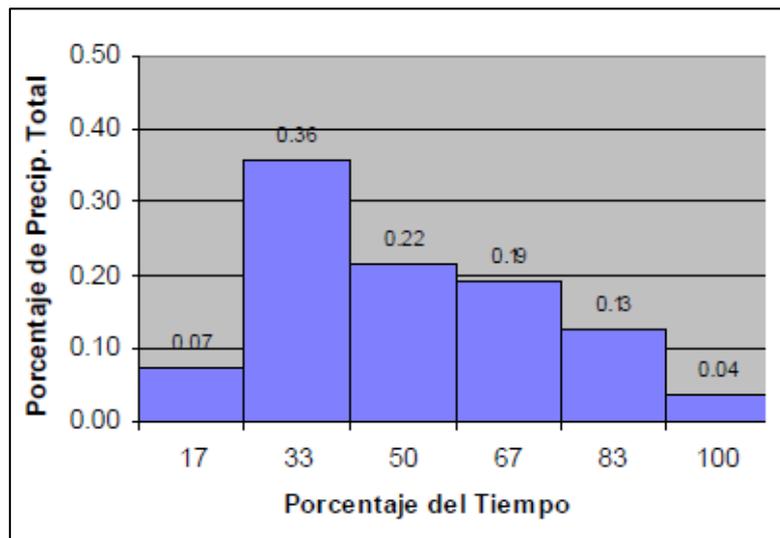


Figura 5.6. Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Concordia.

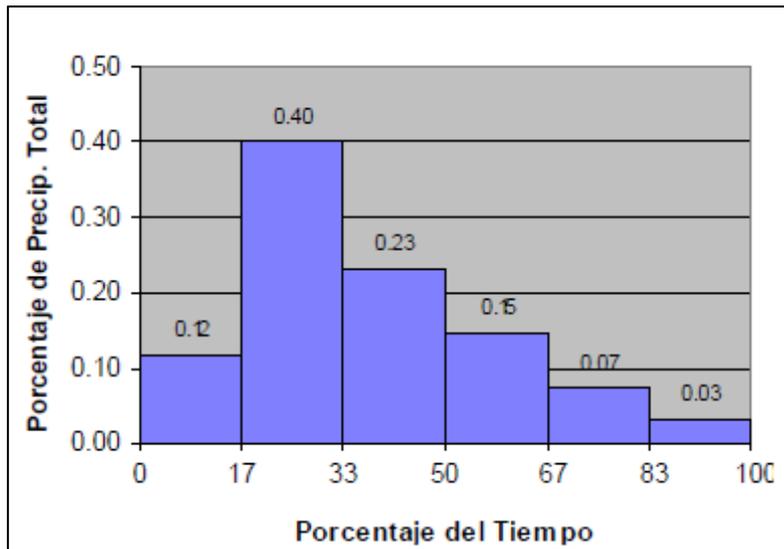


Figura 5.7. Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Paraná.

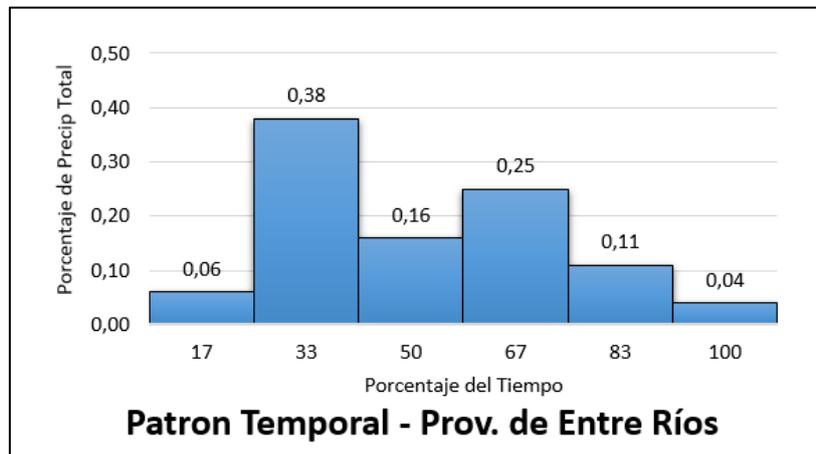


Figura 5.8. Patrones de Distribución Temporal para la Provincia de Entre Ríos.

Con toda la información necesaria, se hizo la distribución de la precipitación media areal con ambos hietogramas para las duraciones mencionadas y las recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Utilizando el modelo hidrológico de la cuenca del Río Gualeguaychú, se cargaron los hietogramas de bloque alternos y los de patrones temporales y se obtuvieron los caudales pico en la sección correspondiente a la estación de la Ruta Provincial N°39 para cada duración y cada recurrencia (tabla 5.6).

PATRONES TEMPORALES - Q (m^3/s)				
RECURRENCIA (años)	4 DIAS	6 DIAS	8 DIAS	10 DIAS
100	667,0	747,7	743,6	726,2
50	595,6	671,0	670,6	657,1
20	493,3	561,6	566,5	559,1
10	407,3	462,3	467,1	461,9
5	328,0	377,7	386,6	385,6
2	202,9	230,2	234,4	233,6

BLOQUES ALTERNOS - Q (m^3/s)				
RECURRENCIA (años)	4 DIAS	6 DIAS	8 DIAS	10 DIAS
100	672,1	789,9	872,6	937,6
50	600,4	708,6	784,6	844,7
20	497,4	591,9	657,4	710,5
10	412,5	490,3	544,5	589,1
5	331,8	398,5	444,1	482,1
2	206,8	245,1	269,7	291,3

Tabla 5.6. Caudales Máximos obtenidos del Modelo Hidrológico.

Posteriormente, se graficaron los resultados del modelo junto con la serie de valores obtenidos en el análisis estadístico de los caudales registrados en la estación de aforos. A continuación, se presentan los correspondientes a la función de distribución GEV, que había sido considerada la con menor error. Los gráficos siguientes (figuras 5.9 y 5.10) muestran los valores de caudales obtenidos en el modelo al cargar los hietogramas, junto con la serie de valores de la función de distribución GEV.

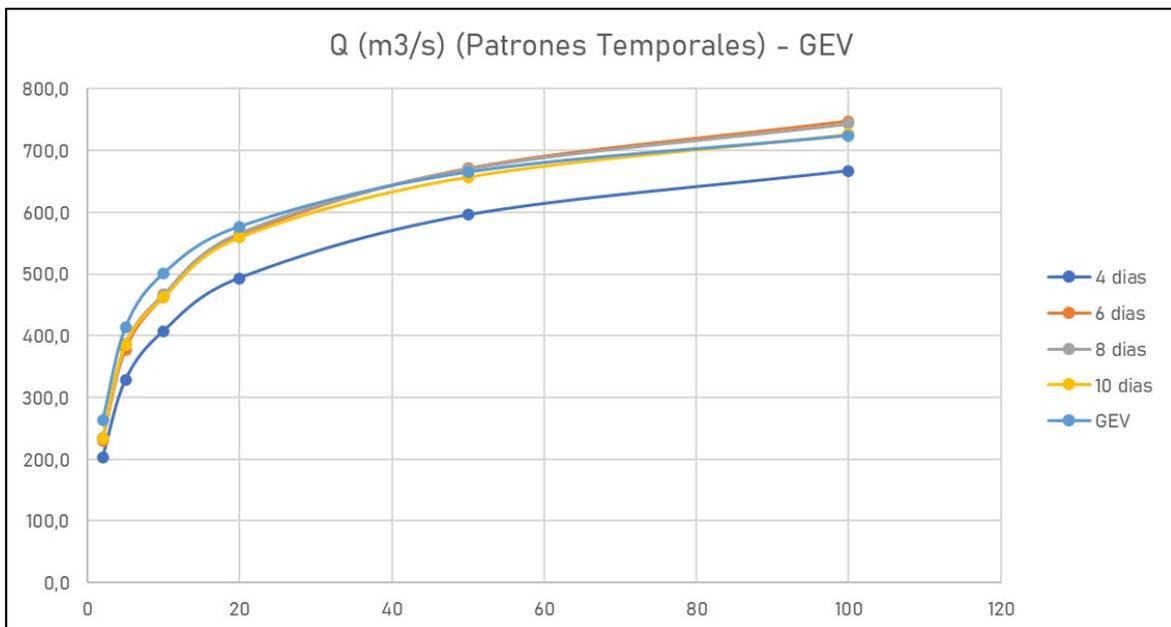


Figura 5.9. Caudales obtenidos en el modelo para hietogramas de bloques alternos junto con los de la función GEV.

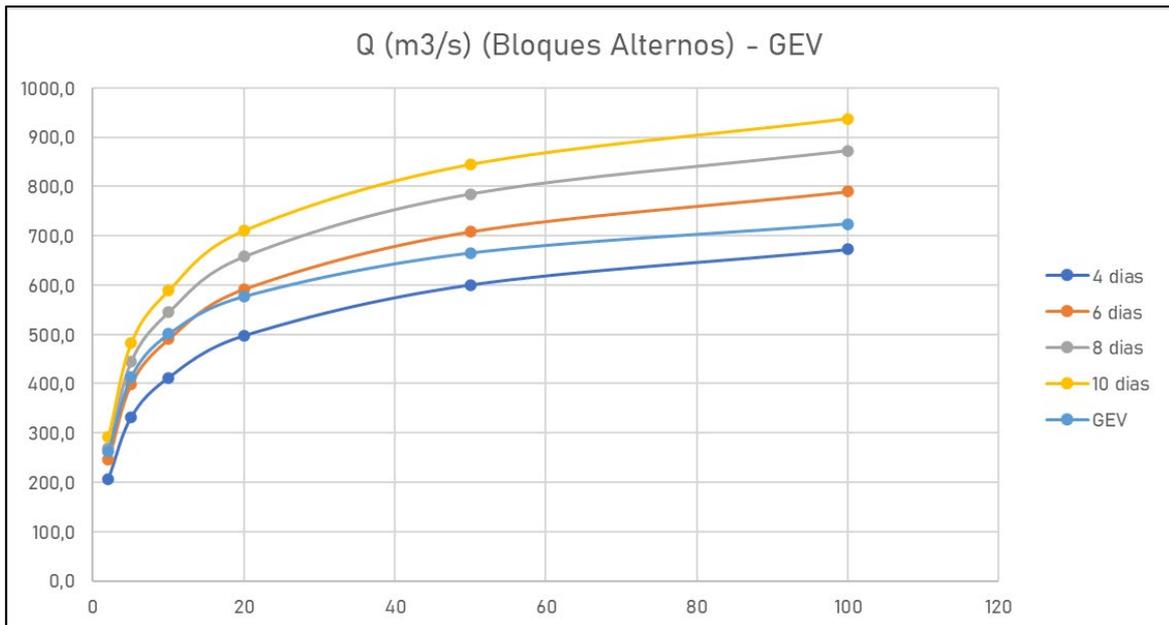


Figura 5.10. Caudales obtenidos en el modelo para hietogramas de patrones temporales junto con los de la función GEV.

Observando ambos gráficos se pudo concluir que la mejor aproximación entre los caudales del modelo y los obtenidos del análisis de frecuencias se daban para una duración de tormenta de 6 días. Además, se observó claramente que los resultados para hietogramas de patrones temporales eran más confiables, ya que a partir de una cierta duración de tormenta los caudales se volvían prácticamente constantes, mientras que para hietogramas de bloques alternos el caudal pico siempre iba en aumento.

Teniendo en cuenta el tiempo de concentración de la cuenca con cierre en la Ruta Provincial N°39, que según la fórmula de Kirpich es de 53,4 hs y según la fórmula de Illinois de 60,9 hs, siendo entonces un valor de alrededor de 2,5 días; y, por otro lado, habiéndose encontrado que la duración de tormenta que se ajustaba con los caudales esperados fue la de 6 días; se encontró una relación Tiempo de Concentración – Duración de la Tormenta de aproximadamente 2,4.

Teniendo en cuenta este valor, se tomó como duración de tormenta un valor de entre 2 y 3 veces el tiempo de concentración de las subcuencas en estudio.

5.3. Análisis de caudales para diferentes Subcuencas

Para el análisis de caudales máximos de las distintas subcuencas del Gualeguaychú se comenzó por hacer una categorización de éstas en “órdenes”, de esta manera, se denominaron **Subcuencas de Primer Orden** a aquellas que no poseían tramos de tránsito por cauces; y como de **Orden N** a aquellas en que descargaban cuencas de orden inferior y tenían **n-1** tramos de tránsito sucesivos.

De acuerdo con lo anterior, se definieron quince subcuencas de 1° orden, ocho de 2°, cuatro de 3°, tres de 4°, y solamente una subcuenca para los órdenes entre 5° a 16°. En la tabla siguiente (tabla 5.7) se muestra todas las subcuencas mencionadas. La figura 5.11 muestra el mapa de la cuenca con sus subdivisiones.

Orden	Subcuenca	Area (km ²)	Orden	Subcuenca	Area (km ²)
1	CP01W92	167,71	3	CP05W90	532,265
	CP02W141	169,561		CP08W450	906,891
	CP03W150	264,66		CP13W720	516,295
	CP04W280	360,962		CP15W930	855,597
	CP06W420	149,526	4	CP05W230	977,646
	CP09W530	321,98		CP10W580	1301,993
	CP10W610	187,738		CP15W920	1250,77
	CP12W710	194,897	5	CP06W331	1687,22
	CP12W821	169,386	6	CP07W330	1831,075
	CP13W830	144,736	7	CP07W1020	2040,297
	CP14W860	370,277	8	CP07W440	2280,74
	CP15W960	96,18	9	CP10W600	3674,239
	CP15W980	120,448	10	CP11W630	4098,925
	CP16W1060	150,86	11	CP11W740	4763,484
	CP16W1070	71,413	12	CP13W800	4886,916
	2	CP02W91	373,696	13	CP13W870
CP04W190		516,043	14	CP15W1040	6387,891
CP05W140		291,99	15	CP15W1030	6664,157
CP08W360		620,501	16	CP15W1000	6974,04
CP12W680		395,866			
CP13W820		328,531			
CP14W950		702,802			
CP16W1050		270,823			

Tabla 5.7. Subcuencas del río Gualeguaychú.

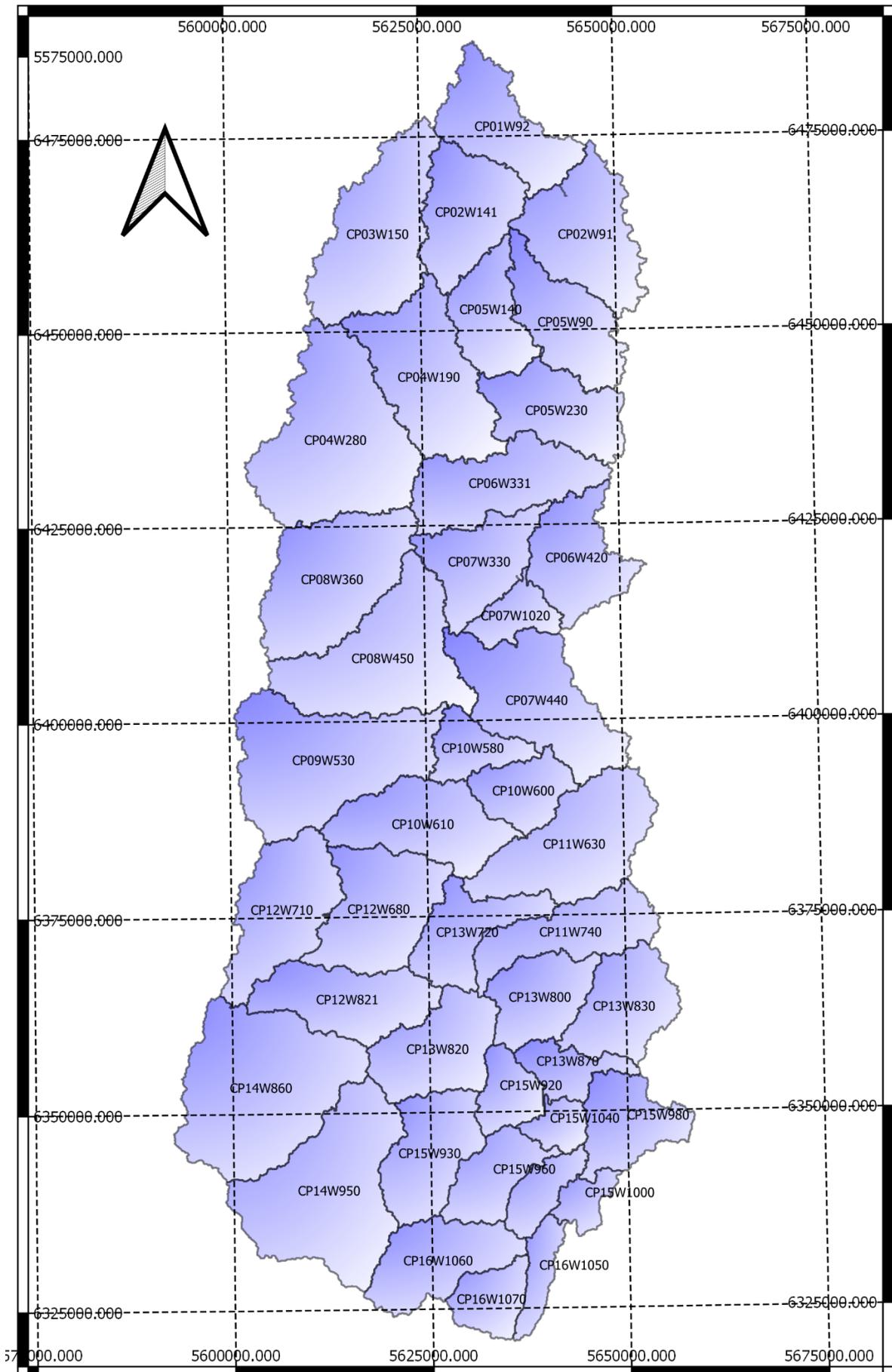


Figura 5.11. Subcuencas del río Gualeguaychú.

Además de la duración y distribución temporal de la tormenta ya comentada, otra consideración que debió hacerse fue respecto a la distribución areal de la precipitación. Ya que, a diferencia de cuando se analizó aguas arriba de la Ruta N°39, no se contaba con curvas IDF para cada subcuenca.

Para ello, y basándose en la información obtenida en el proyecto de investigación de Estudio de Tormentas de Diseño de Cuencas Extensas en la Provincia de Entre Ríos (Lopez et al., 2020) se utilizaron coeficientes de abatimiento areal (CAA). En dicho estudio se obtuvieron los CAA para tres puntos de control: Ruta Nacional N°130, Ruta Provincial N°39 y en la Ciudad de Gualeguaychú.

El criterio que se adoptó para el cálculo del coeficiente de abatimiento areal para cada subcuenca fue el siguiente:

- Para cada orden de subcuencas definido, se calculó el promedio de las superficies, con el objetivo de adoptar una serie de CAA única para las subcuencas de un orden, y que sólo sean función de la duración de la tormenta y de la recurrencia.
- Se eligió una estación de referencia entre los puntos de control mencionados anteriormente. El criterio fue seleccionar aquella cuya área sea la más cercana en magnitud, por exceso o por defecto.
- A partir de la información del estudio de tormentas mencionado se calcularon los CAA para las estaciones de referencia.
- Se calcularon las precipitaciones medias areales de las estaciones de referencia haciendo uso de las curvas IDF.
- Con el área promedio de las subcuencas de cada orden, se calcularon los CAA.
- Haciendo la relación entre el CAA de las estaciones de referencia y el de las subcuencas en estudio, se obtuvo un factor, que luego se aplicó a la precipitación media areal de la estación de referencia, para así obtener la correspondiente a las subcuencas de un determinado orden.
- En el Estudio de Tormentas de Diseño de Cuencas Extensas en la Provincia de Entre Ríos (Mastaglia et al, 2017), se obtuvieron coeficientes

para calcular el CAA para duraciones de tormenta de 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 días, pero en la cuenca del Gualeguaychú, existían numerosos casos de subcuencas cuya duración de tormentas no podían encasillarse dentro de éstas. La solución que se adoptó fue que, dada la poca variación que había en el factor obtenido de la relación entre los CAA para dos duraciones de tormenta consecutivas, el error que se cometía al hacer una interpolación lineal entre los anteriores era mínimo, por lo que se adoptó dicho procedimiento.

Por último, se procedió a cargar los modelos en HEC-HMS y obtener los valores de caudales máximos para cada subcuenca en función de cada recurrencia. A continuación, se presentan los valores obtenidos para los órdenes 1°, 2° y 10° (tablas 5.8, 5.9 y 5.10).

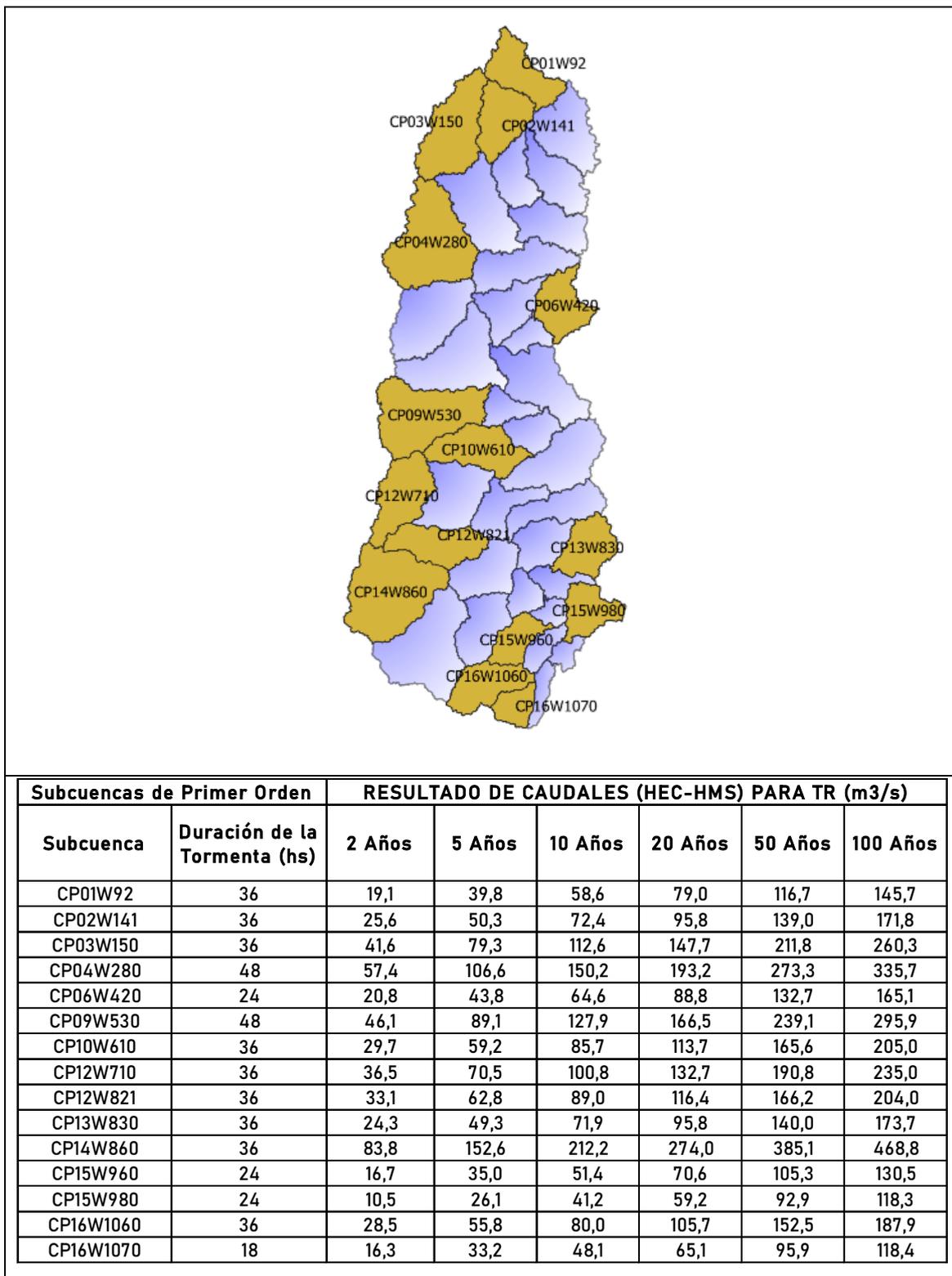
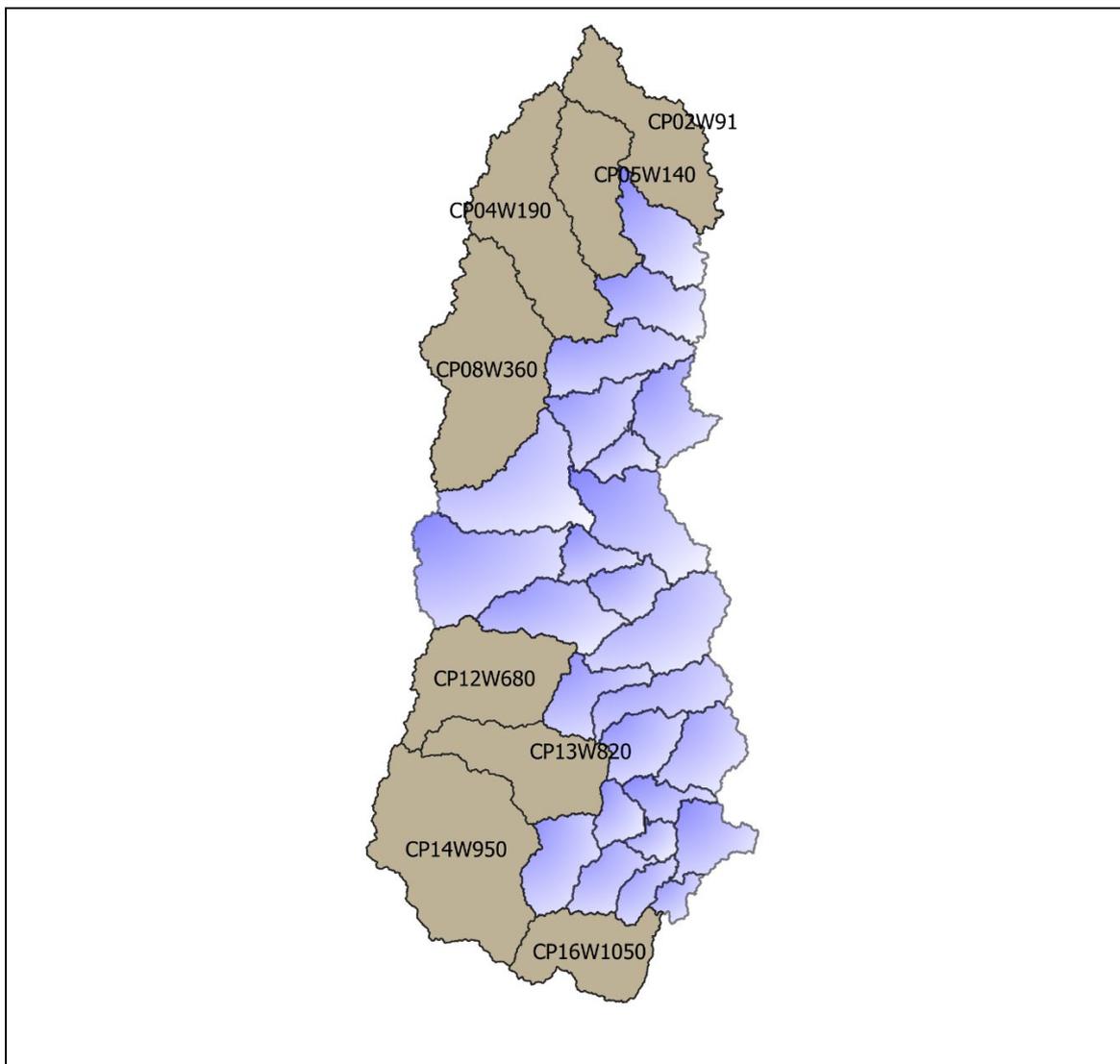
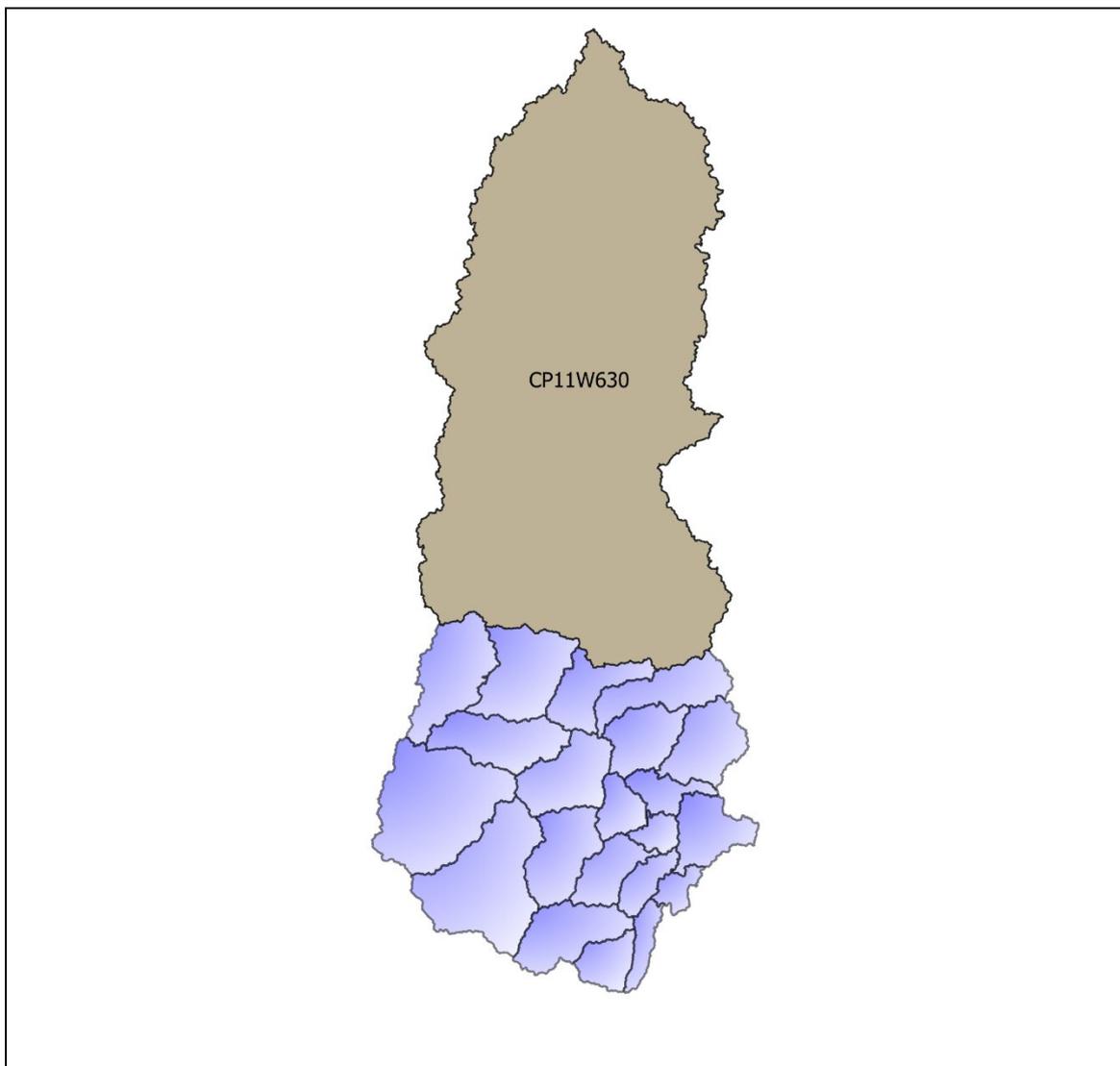


Tabla 5.8. Subcuencas de 1° Orden.



Subcuencas de Segundo Orden		RESULTADO DE CAUDALES (HEC-HMS) PARA TR (m3/s)					
Subcuenca	Duración de la Tormenta (hs)	2 Años	5 Años	10 Años	20 Años	50 Años	100 Años
CP02W91	54	42,6	76,4	111,2	148,4	211,4	262,8
CP04W190	72	65,2	122,5	175,1	226,3	311,2	381,2
CP05W140	48	40,0	76,0	109,0	143,8	202,2	248,8
CP08W360	54	90,3	166,0	233,6	302,9	417,8	509,6
CP12W680	48	69,4	121,0	161,1	211,5	296,9	365,5
CP13W820	54	38,9	75,2	111,0	149,0	213,5	265,9
CP14W950	48	136,7	243,0	336,3	433,0	592,1	717,7
CP16W1050	36	48,1	89,5	123,6	154,0	218,0	269,9

Tabla 5.9. Subcuencas de 2º Orden.



Subcuencas de Décimo		RESULTADO DE CAUDALES (HEC-HMS) PARA TR (m3/s)					
Subcuenca	Duración de la Tormenta (hs)	2 Años	5 Años	10 Años	20 Años	50 Años	100 Años
CP11W630	180	417,1	680,9	811,1	986,2	1110,2	1229,4

Tabla 5.10. Subcuencas de 10° Orden.

5.4. Agrupamiento de las Variables

Ya con toda la información de cada una de las subcuencas, debían buscarse patrones o características que permitieran relacionar unas con otras, el cual era uno de los objetivos de este proyecto. Por ello, a partir de los distintos parámetros con que se contaba de cada subcuenca y los caudales obtenidos del modelo para las distintas recurrencias, se realizó un análisis de correlación para encontrar la interdependencia que había entre las distintas variables mediante la utilización del software estadístico R Studio.

Cabe aclarar, que, si bien se evaluó la relación entre cada variable con el resto, el objetivo era encontrar la dependencia que tenía el caudal máximo con el resto de las variables, y cuáles eran las que mayor participación tenían en su variación.

A manera de organizar el estudio, se decidió trabajar en base a una sola recurrencia inicialmente, y así una vez alcanzados los resultados finales, decidir cómo se procedería con el análisis de las demás recurrencias. Se trabajó entonces tomando como base los valores pertenecientes a la recurrencia de 2 años.

Para la realización del análisis mencionado, se tomaron los valores correspondientes a trece variables, además del caudal que era la variable de interés. Las variables elegidas para el análisis fueron:

- El caudal máximo correspondiente a la recurrencia de 2 años (Q).
- El área (A).
- La raíz cuadrada del área ($A^{1/2}$).
- El perímetro (P).
- El coeficiente de compacidad (K_c).
- La longitud del cauce principal (L).
- La pendiente media del cauce principal (S).
- El tiempo de concentración (T_c).
- El coeficiente de almacenamiento (R).
- El coeficiente Lambda que relaciona los dos anteriores (λ).

- El número de curva ponderado (CN).
- La precipitación media areal correspondiente a la recurrencia de 2 años (PMA).
- La precipitación diaria en la estación núcleo de la cuenca para la recurrencia de 2 años (Pd).
- El tiempo de recurrencia (Tr).

Posteriormente, durante el procesamiento de los datos, tanto la precipitación diaria en la estación núcleo de la cuenca como el tiempo de recurrencia, se descartaron del análisis con el software, ya que al tratarse de valores constantes para cada recurrencia que se repetían para todas las cuencas, era imposible que el software encontrase una relación con las demás variables, por lo que finalmente, fueron once las variables que entraron en el estudio.

El primer método empleado para evaluar la interdependencia entre las variables fue el de las matrices de correlación (figura 5.12). Con esta se observó que muchas variables tenían buena correlación con el caudal máximo Q pero también con otras variables. Esto planteó el problema de si se debiesen tomar o no dos variables que además de correlacionar bien con el caudal tenían buena coincidencia entre sí, teniendo en cuenta también que eran pocas las que no estaban dentro de esta situación.

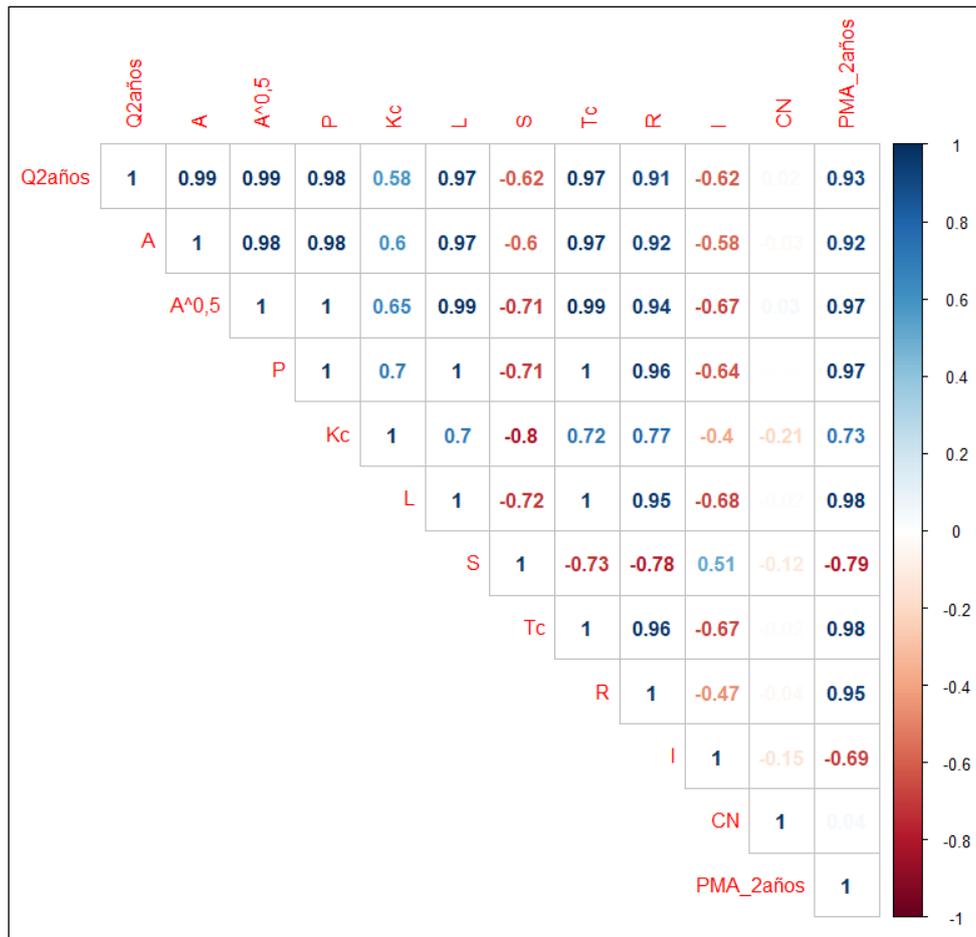


Figura 5.12. Matriz de Correlación de Variables para 2 años de recurrencia.

Con el objetivo de volver a evaluar la relación entre las variables y también comparar con los resultados de la matriz, se realizó un segundo procesamiento, a través del análisis de componentes principales. Se obtuvo una representación gráfica de las variables como vectores que en función de sus posiciones relativas mostraban la dependencia de unas con otras (figura 5.13). El resultado confirmó las relaciones obtenidas anteriormente con la matriz de correlación, acumulando un gran número de variables en una misma zona.

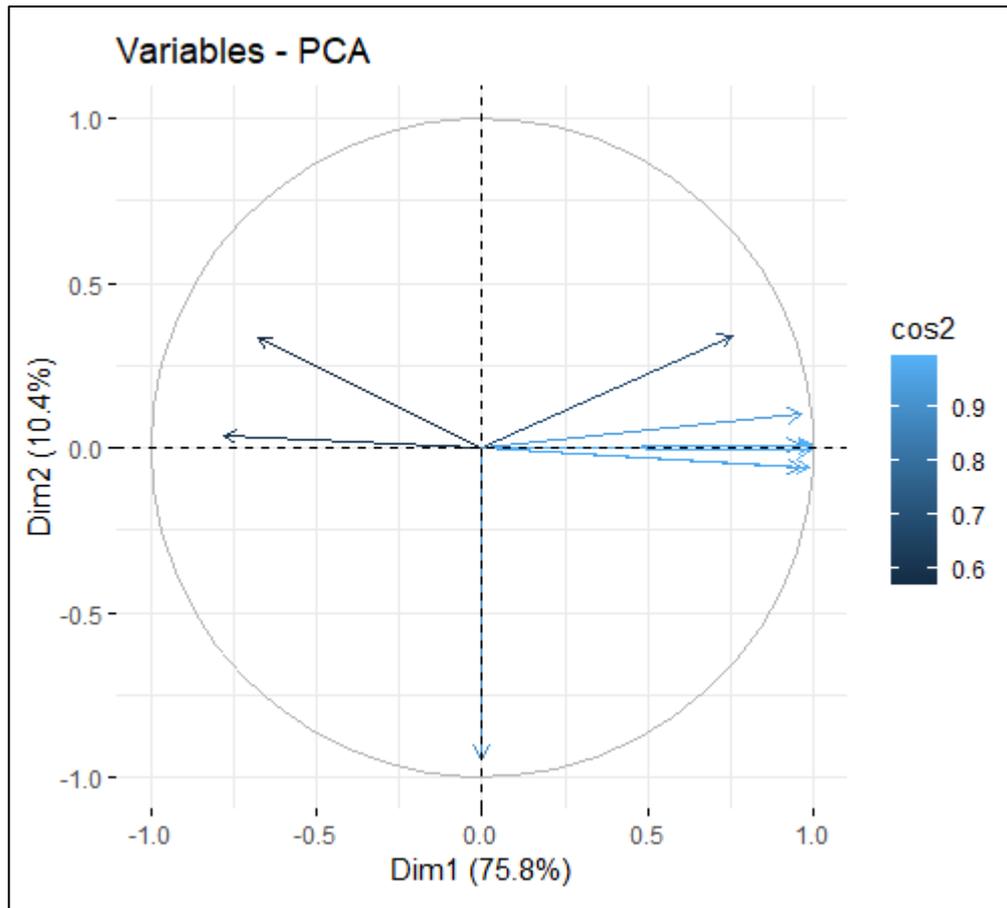


Figura 5.13. Análisis de Componentes Principales de Variables para 2 años de recurrencia.

Hay que mencionar un inconveniente que se presentó al hacer estos análisis, se trataba de los distintos órdenes de magnitud que existían en las variables, teniendo por ejemplo variables con cifras que alcanzaban valores de varios miles como el área o las longitudes de cauces, y por otro lado la pendiente cuyas primeras cifras distintas de cero coincidían con la quinta o sexta cifra decimal. Esto hacía que las primeras tuvieran mayor peso sobre los resultados del estudio. Para solucionar este problema, en ambos casos se realizó la estandarización de las variables, llevando a que cada serie de datos tuviese media igual a cero y desviación estándar igual a uno; a través de lo cual se logró independizar los resultados del orden de magnitud de las variables. La fórmula utilizada para la estandarización está dada en la sección de la sección 3.2.2.4.

Como un tercer análisis de las variables, se eligió realizar un agrupamiento mediante clusterización o conglomerados, a través del cual se

obtuvieron dendogramas que mostraban gráficamente los agrupamientos entre las variables en función de la interdependencia que entre ellas existía (figura 5.14). El resultado fue similar a los de los métodos anteriormente utilizados.

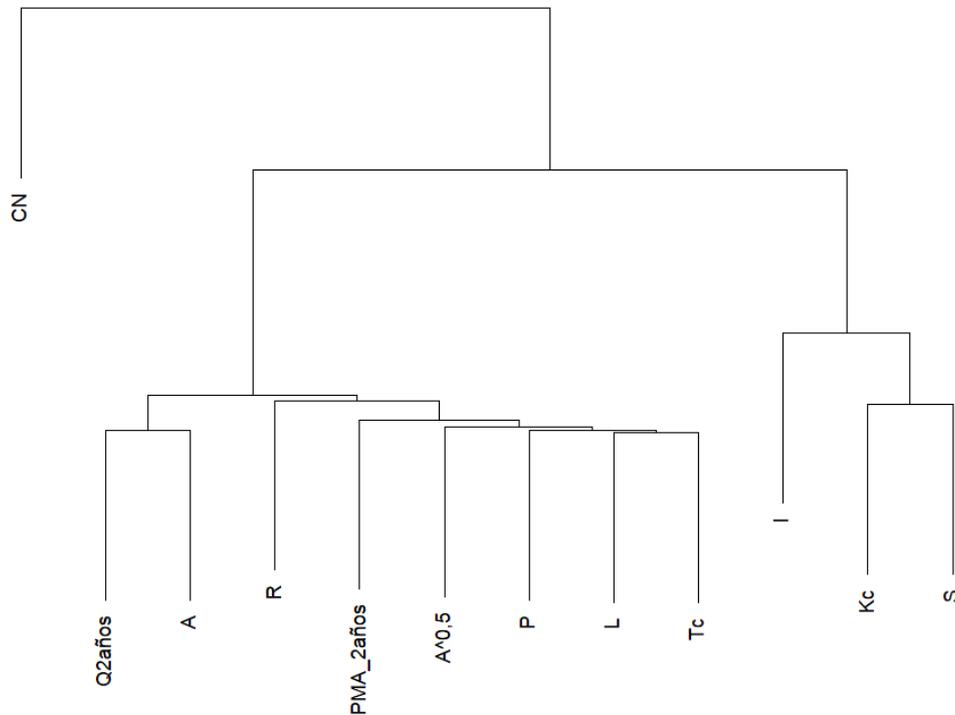


Figura 5.14. Clusterización de Variables para 2 años de recurrencia.

A partir de ellos, y teniendo en cuenta principalmente los coeficientes de correlación obtenidos de la matriz homónima del caudal con las demás variables se seleccionaron cinco de ellas que mostraban una buena correlación con el caudal máximo, para utilizarlas en el estudio de agrupamiento de las subcuencas en función de sus características.

Las mismas se ordenaron en función del valor del coeficiente de mayor a menor. Las cinco variables seleccionadas fueron:

- El área (A).
- La longitud del cauce principal (L).
- La precipitación media areal correspondiente a la recurrencia de 2 años (PMA).
- La pendiente media del cauce principal (S).
- El coeficiente de compacidad (Kc).

Bajo el concepto práctico de adoptar variables fácilmente obtenibles y también un número reducido de las mismas, se optó por tomar finalmente 3 variables para realizar el análisis, teniendo en cuenta además que todas eran independientes entre sí. Las variables seleccionadas fueron:

- El área (A).
- La precipitación media areal correspondiente a la recurrencia de 2 años (PMA).
- La pendiente media del cauce principal (S).

Los valores que toman las variables mencionadas para cada subcuenca se muestran a continuación (tabla 5.11).

Nombres	Q _{2años} m ³ /s	A km ²	S m/m	PMA _{2años} mm
CP01W92	19,10	167,64	0,000924567	98,86
CP02W141	25,60	169,49	0,001014655	98,86
CP03W150	41,60	264,57	0,000962649	98,86
CP04W280	57,40	360,85	0,000825452	106,36
CP06W420	20,80	149,45	0,001491620	88,72
CP09W530	46,10	321,88	0,001041953	106,36
CP10W610	29,70	187,67	0,001572621	98,86
CP12W710	36,50	194,84	0,001449605	98,86
CP12W821	33,10	169,33	0,001638802	98,86
CP13W830	24,30	144,66	0,001799198	98,86
CP14W860	83,80	370,18	0,001600309	98,86
CP15W960	16,70	96,14	0,002379965	88,72
CP15W980	10,50	120,38	0,001815307	88,72
CP16W1060	28,50	150,8	0,001841689	98,86
CP16W1070	16,30	71,38	0,002946292	88,72
CP02W91	42,60	373,52	0,000662096	107,55
CP04W190	65,20	515,85	0,000600001	117,11
CP05W140	40,00	291,86	0,000823664	103,87
CP08W360	90,30	620,3	0,000668404	107,55
CP12W680	69,40	395,74	0,001012068	103,87
CP13W820	38,90	328,41	0,001328297	107,55
CP14W950	136,70	702,6	0,001254766	103,87
CP16W1050	48,10	270,71	0,001535972	95,45
CP05W90	63,90	532,01	0,000582296	115,94
CP08W450	123,00	906,59	0,000633470	115,94
CP13W720	87,50	516,12	0,000927887	115,94
CP15W930	155,20	855,34	0,001112273	115,94
CP05W230	126,00	977,18	0,000517383	125,92
CP10W580	176,60	1301,56	0,000594326	125,92
CP15W920	173,30	1250,36	0,000947526	114,66
CP06W331	209,60	1686,48	0,000485005	129,75
CP07W330	211,20	1830,27	0,000470012	129,62
CP07W1020	233,20	2039,39	0,000467369	141,40
CP07W440	233,90	2279,69	0,000434528	141,20
CP10W600	382,70	3672,72	0,000435876	140,35
CP11W630	417,10	4097,21	0,000406345	150,28
CP11W740	444,50	4761,52	0,000394821	148,84
CP13W800	454,80	4884,9	0,000400104	152,37
CP13W870	461,40	5094,32	0,000385716	152,31
CP15W1040	620,30	6385,33	0,000380318	158,72
CP15W1030	640,20	6661,46	0,000371630	158,66
CP15W1000	666,80	6971,21	0,000367520	158,59

Tabla 5.11. Valores de las variables seleccionadas para cada subcuenca.

5.5. Agrupamiento de las Subcuencas

A partir de las variables seleccionadas, se procesaron con R Studio las 42 subcuencas estudiadas del río Gualeguaychú, haciendo un análisis mediante clusters para obtener el dendograma de agrupamiento de las mismas (figura 5.15). En vista de la ramificación que se presentaba, se decidió en primera instancia tomar los cuatro grupos claramente diferenciados, y evaluar a que resultados se llegaba con ellos.

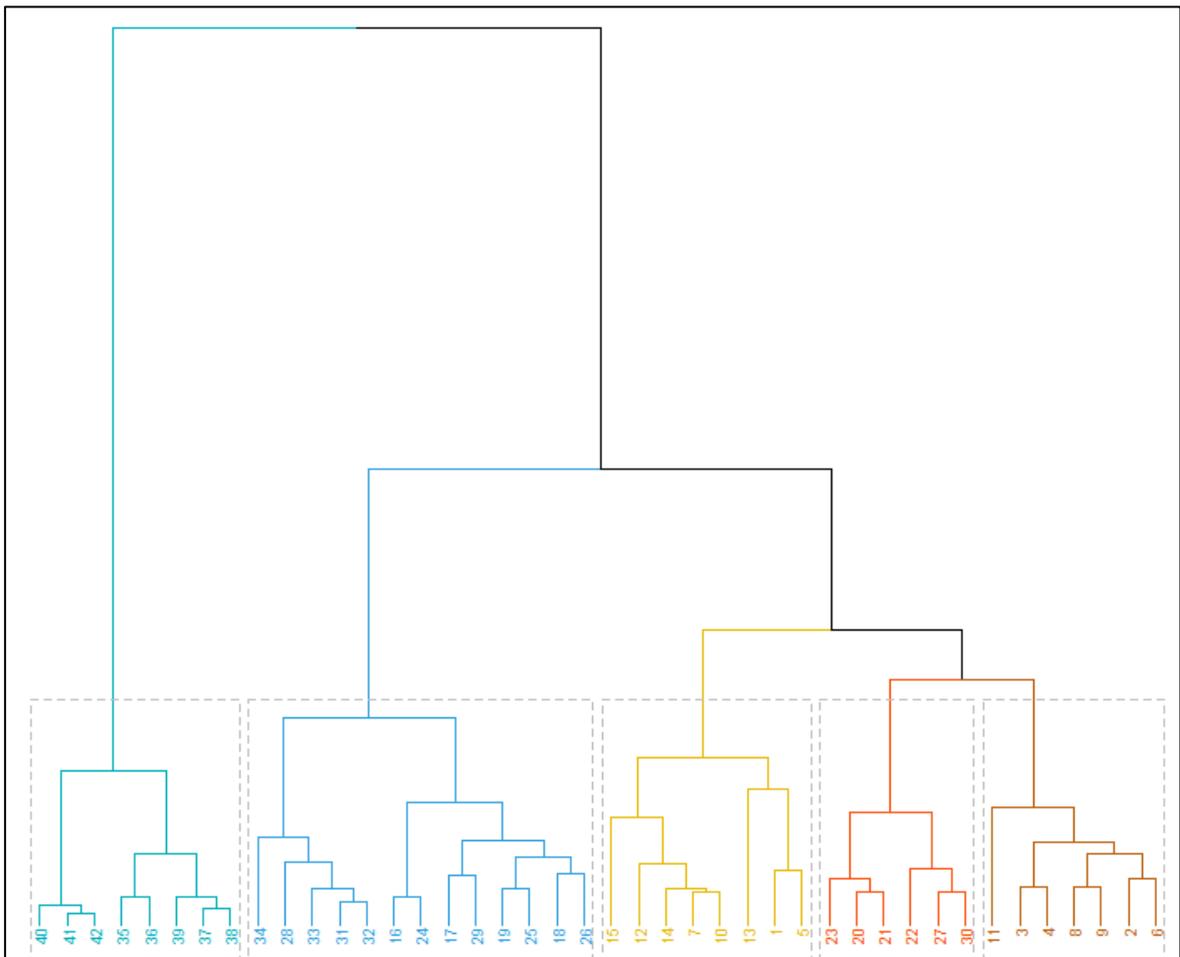


Figura 5.151. Clusterización de las subcuencas.

De forma paralela al trabajo con el software, y a modo de comparación o verificación se hizo también la evaluación del agrupamiento de las subcuencas mediante el trazado de las curvas de Andrews para cada de ellas (Figura 5.16).

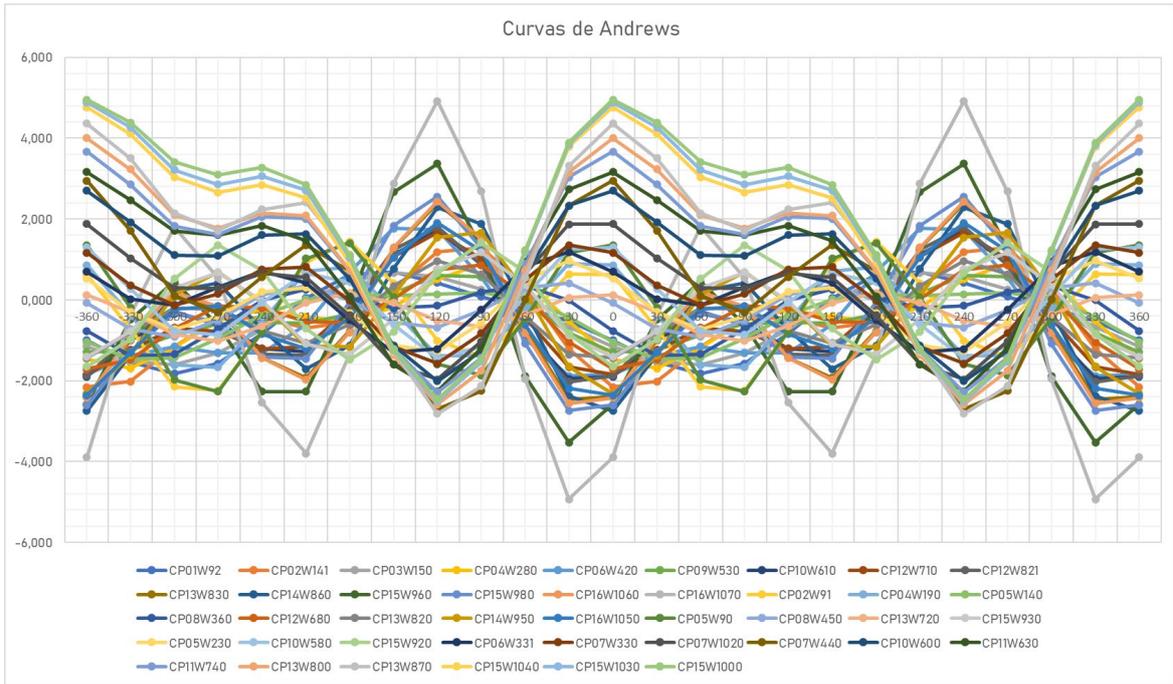


Figura 5.16. Curvas de Andrews para todas las subcuencas.

Separando las curvas conforme a los grupos diferenciados en el dendograma (figuras 5.17 a 5.21), se observó que efectivamente había similitudes en cuanto a amplitudes, períodos y formas en general.

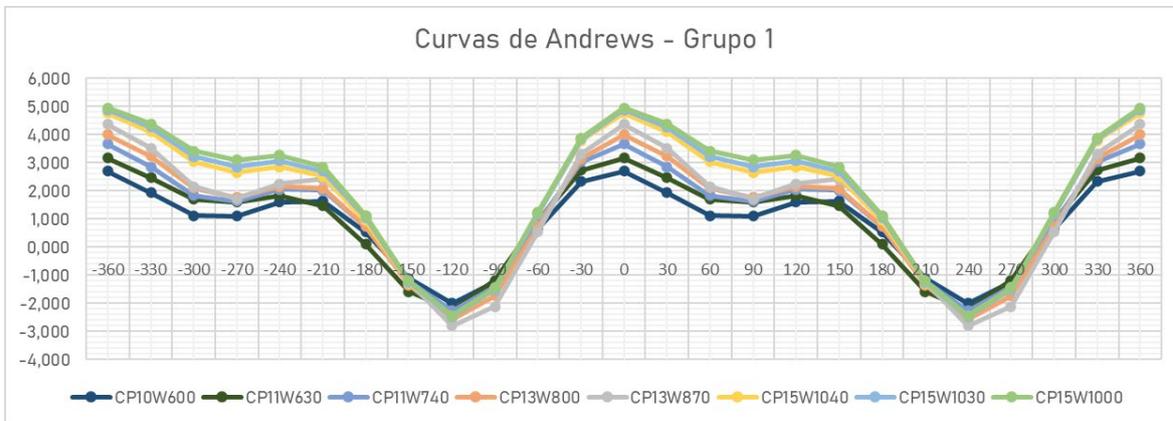


Figura 5.17. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 1.

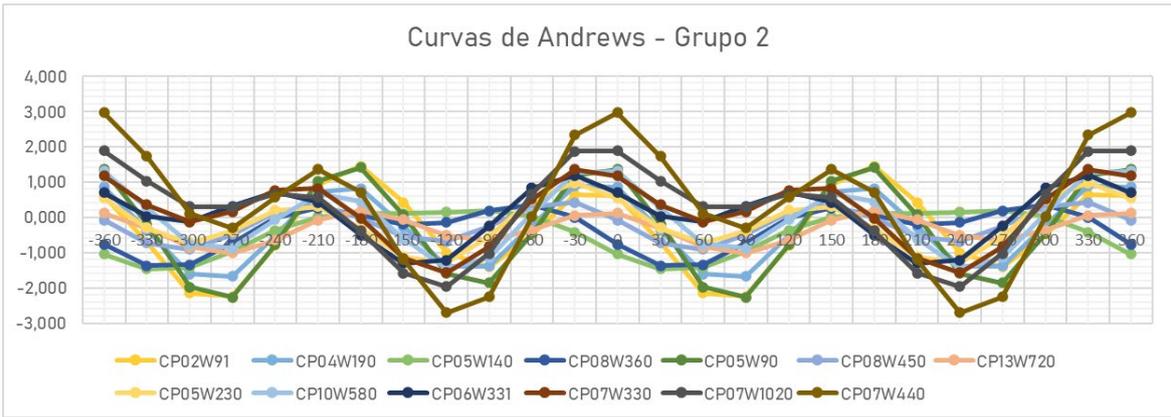


Figura 5.18. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 2.

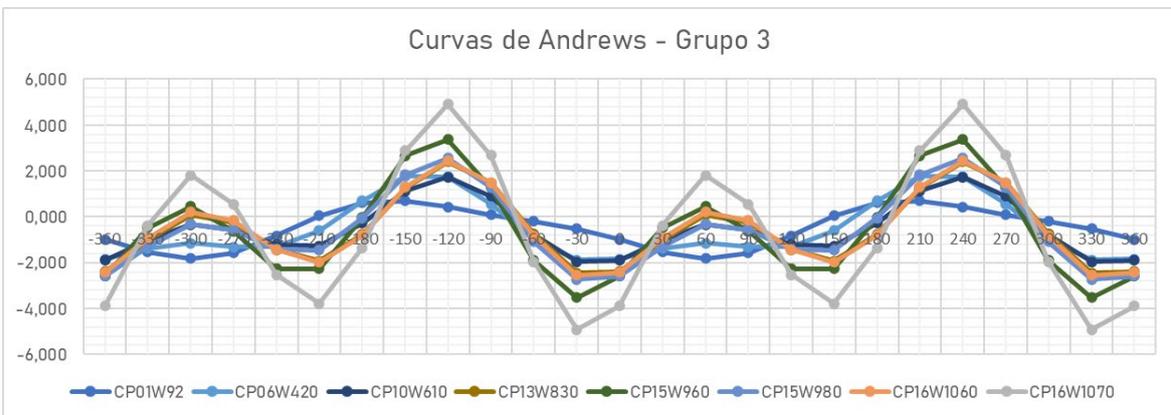


Figura 5.19. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 3.

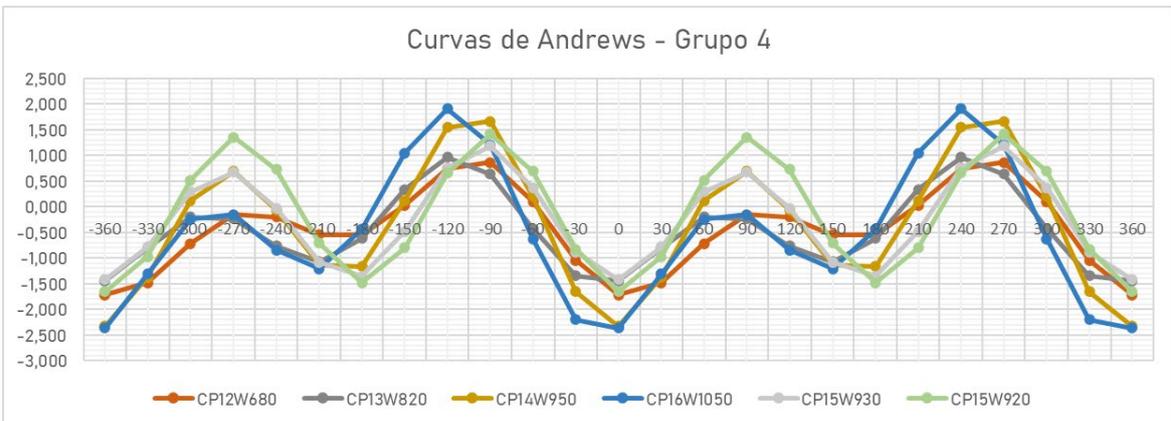


Figura 5.20. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 4.

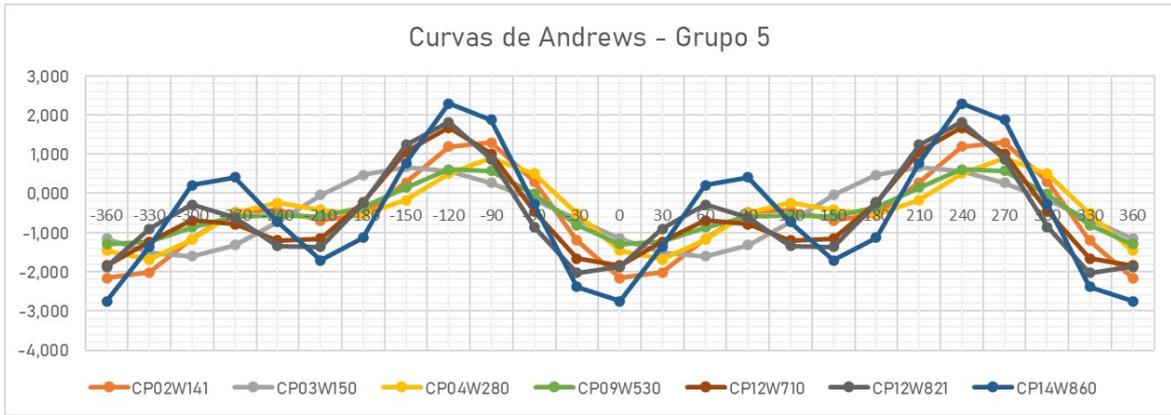


Figura 5.21. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 5.

5.6. Obtención de Ecuaciones y Reformulación de los Agrupamientos

A continuación, respetando la división en grupos mencionada, se procedió a la obtención de las expresiones para determinar valores de caudales máximos para cada grupo.

Las ecuaciones se obtuvieron por medio de una de las funciones del software R, que en función de las variables seleccionadas entrega una expresión que contiene relaciones lineales entre cada una de ellas y el caudal. Posteriormente, se reemplazaron los parámetros de cada cuenca dentro de las expresiones y se evaluó el resultado en base a la comparación con los caudales obtenidos mediante el modelo y el cálculo de los errores.

En vista de la existencia de casos puntuales en que los errores en algunas cuencas que disparaban, y también, de manera general para bajar los errores promedio por grupos, se optó por aplicar logaritmo a todas las variables y volver a obtener las expresiones. Al hacerlo, el segundo objetivo se alcanzó, pero aún seguían existiendo cuencas con errores elevados, superiores al 20% (resultados en tablas 5.12 a 5.16).

Grupo 1:

$$\log Q = 2,7017 + 1,1804 * \log A + 1,7201 * \log S + 0,6741 * \log PMA$$

Grupo 1	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP10W600	382,70	2,58	377,24	1,43%	1,43%
	CP11W630	417,10	2,60	398,37	4,49%	4,49%
	CP11W740	444,50	2,65	449,79	-1,19%	1,19%
	CP13W800	454,80	2,68	481,85	-5,95%	5,95%
	CP13W870	461,40	2,68	475,29	-3,01%	3,01%
	CP15W1040	620,30	2,79	622,72	-0,39%	0,39%
	CP15W1030	640,20	2,80	628,96	1,76%	1,76%
	CP15W1000	666,80	2,81	650,86	2,39%	2,39%

Tabla 5.12. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 1.

Grupo 2:

$$\log Q = 1,80298 + 1,16508 * \log A + 0,75234 * \log S - 0,36199 * \log PMA$$

Grupo 2	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP02W91	42,60	1,67	47,07	-10,50%	10,50%
	CP04W190	65,20	1,79	61,74	5,31%	5,31%
	CP05W140	40,00	1,62	42,15	-5,36%	5,36%
	CP08W360	90,30	1,93	85,61	5,20%	5,20%
	CP05W90	63,90	1,80	62,80	1,72%	1,72%
	CP08W450	123,00	2,10	124,50	-1,22%	1,22%
	CP13W720	87,50	1,93	86,07	1,64%	1,64%
	CP05W230	126,00	2,05	113,24	10,13%	10,13%
	CP10W580	176,60	2,24	175,52	0,61%	0,61%
	CP06W331	209,60	2,30	201,51	3,86%	3,86%
	CP07W330	211,20	2,34	216,57	-2,54%	2,54%
	CP07W1020	233,20	2,37	237,04	-1,65%	1,65%
CP07W440	233,90	2,41	255,62	-9,29%	9,29%	

Tabla 5.13. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 2.

Grupo 3:

$$\log Q = -5,4142 + 0,7385 * \log A + 0,6637 * \log S + 3,5383 * \log PMA$$

Grupo 3	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP01W92	19,10	1,27	18,79	1,63%	1,63%
	CP06W420	20,80	1,21	16,17	22,28%	22,28%
	CP10W610	29,70	1,46	29,05	2,18%	2,18%
	CP13W830	24,30	1,42	26,21	-7,87%	7,87%
	CP15W960	16,70	1,20	15,91	4,70%	4,70%
	CP15W980	10,50	1,20	15,70	-49,50%	49,50%
	CP16W1060	28,50	1,44	27,45	3,68%	3,68%
CP16W1070	16,30	1,17	14,72	9,71%	9,71%	

Tabla 5.14. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 3.

Grupo 4:

$$\log Q = 3,83075 + 1,26956 * \log A - 0,04871 * \log S - 2,71286 * \log PMA$$

Grupo 4	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP12W680	69,40	1,80	63,64	8,30%	8,30%
	CP13W820	38,90	1,65	45,10	-15,93%	15,93%
	CP14W950	136,70	2,12	130,52	4,52%	4,52%
	CP16W1050	48,10	1,69	48,43	-0,70%	0,70%
	CP15W930	155,20	2,10	125,08	19,41%	19,41%
	CP15W920	173,30	2,32	210,38	-21,39%	21,39%

Tabla 5.15. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 4.

Grupo 5:

$$\log Q = 3,3935 + 1,2270 * \log A + 0,4734 * \log S - 1,6548 * \log PMA$$

Grupo 5	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP02W141	25,60	1,41	25,71	-0,43%	0,43%
	CP03W150	41,60	1,64	43,31	-4,11%	4,11%
	CP04W280	57,40	1,72	52,21	9,03%	9,03%
	CP09W530	46,10	1,70	50,67	-9,92%	9,92%
	CP12W710	36,50	1,56	36,12	1,05%	1,05%
	CP12W821	33,10	1,51	32,22	2,65%	2,65%
	CP14W860	83,80	1,92	83,19	0,73%	0,73%

Tabla 5.16. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 5.

A la opción de encontrar ecuaciones para cada una de ellas, con la metodología desarrollada para los caudales máximos de 2 años de recurrencia, se planteó la alternativa de encontrar una serie de coeficientes que permitiesen obtener caudales para cualquier recurrencia en función de las expresiones para 2 años.

Con los resultados de caudales máximos obtenidos para la recurrencia de 2 años se buscaron correlaciones con los caudales máximos para las demás recurrencias.

El procedimiento adoptado fue el de la obtención de los índices de creciente, el cual, mediante la relación entre los caudales para distintas recurrencias y el correspondiente a una recurrencia base, en este caso 2 años, entrega una serie de coeficientes que permiten obtener el caudal buscado multiplicando los caudales de la recurrencia base por dichos coeficientes.

Más precisamente el método toma las relaciones entre los caudales para un determinado grupo de cuencas y las grafica como puntos en función de la recurrencia. La línea de tendencia que se obtiene, de forma logarítmica, tiene como variable X la recurrencia, con lo cual, al reemplazarla se obtiene el coeficiente buscado (Tabla 5.17).

Grupo	Recurrencia (Años)				
	5	10	20	50	100
Grupo 1	1,65	1,94	2,24	2,63	2,92
Grupo 2	1,67	2,36	3,05	3,96	4,65
Grupo 3	1,85	3,19	4,53	6,30	7,64
Grupo 4	1,68	2,51	3,34	4,45	5,28
Grupo 5	1,74	2,75	3,75	5,07	6,07

Tabla 5.17. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.

Siguiendo el procedimiento descrito, se obtuvieron en general buenos resultados (Tablas 5.18 a 5.20), pero en algunos casos se producía una significativa dispersión en algunas subcuencas y en algunas recurrencias.

Grupo 1	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	CP10W600	382,7	377,2	1,43%	618,3	621,60	-0,53%
CP11W630	417,1	398,4	4,49%	680,9	656,43	3,59%	
CP11W740	444,5	449,8	-1,19%	742,7	741,15	0,21%	
CP13W800	454,8	481,9	-5,95%	756,0	793,99	-5,02%	
CP13W870	461,4	475,3	-3,01%	760,7	783,18	-2,95%	
CP15W1040	620,3	622,7	-0,39%	993,2	1026,11	-3,31%	
CP15W1030	640,2	629,0	1,76%	1011,1	1036,39	-2,50%	
CP15W1000	666,8	650,9	2,39%	1047,5	1072,47	-2,38%	

Grupo 2	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	CP02W91	42,6	47,1	-10,50%	76,4	78,78	-3,11%
CP04W190	65,2	61,7	5,31%	122,5	103,32	15,65%	
CP05W140	40,0	42,1	-5,36%	76,0	70,53	7,19%	
CP08W360	90,3	85,6	5,20%	166,0	143,27	13,69%	
CP05W90	63,9	62,8	1,72%	108,2	105,10	2,87%	
CP08W450	123,0	124,5	-1,22%	221,5	208,36	5,93%	
CP13W720	87,5	86,1	1,64%	142,2	144,04	-1,30%	
CP05W230	126,0	113,2	10,13%	215,3	189,51	11,98%	
CP10W580	176,6	175,5	0,61%	307,4	293,75	4,44%	
CP06W331	209,6	201,5	3,86%	338,4	337,25	0,34%	
CP07W330	211,2	216,6	-2,54%	342,1	362,45	-5,95%	
CP07W1020	233,2	237,0	-1,65%	380,7	396,70	-4,20%	
CP07W440	233,9	255,6	-9,29%	386,1	427,80	-10,80%	

Grupo 3	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	CP01W92	19,1	18,8	1,63%	39,8	34,82	12,50%
CP06W420	20,8	16,2	22,28%	43,8	29,96	31,59%	
CP10W610	29,7	29,1	2,18%	59,2	53,85	9,04%	
CP13W830	24,3	26,2	-7,87%	49,3	48,58	1,45%	
CP15W960	16,7	15,9	4,70%	35,0	29,50	15,72%	
CP15W980	10,5	15,7	-49,50%	26,1	29,10	-11,48%	
CP16W1060	28,5	27,5	3,68%	55,8	50,88	8,82%	
CP16W1070	16,3	14,7	9,71%	33,2	27,28	17,84%	

Grupo 4	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	CP12W680	69,4	63,6	8,30%	121,0	106,68	11,83%
CP13W820	38,9	45,1	-15,93%	75,2	75,60	-0,53%	
CP14W950	136,7	130,5	4,52%	243,0	218,80	9,96%	
CP16W1050	48,1	48,4	-0,70%	89,5	81,19	9,28%	
CP15W930	155,2	125,1	19,41%	269,7	209,67	22,26%	
CP15W920	173,3	210,4	-21,39%	290,3	352,66	-21,48%	

Grupo 5	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	CP02W141	25,6	25,7	-0,43%	50,3	44,83	10,88%
CP03W150	41,6	43,3	-4,11%	79,3	75,52	4,77%	
CP04W280	57,4	52,2	9,03%	106,6	91,05	14,59%	
CP09W530	46,1	50,7	-9,92%	89,1	88,36	0,83%	
CP12W710	36,5	36,1	1,05%	70,5	62,98	10,67%	
CP12W821	33,1	32,2	2,65%	62,8	56,19	10,53%	
CP14W860	83,8	83,2	0,73%	152,6	145,05	4,95%	

Tabla 5.18. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.

Grupo 1	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	CP10W600	740,1	732,77	0,99%	878,8	843,94	3,97%
CP11W630	811,1	656,43	19,07%	986,2	891,22	9,63%	
CP11W740	938,5	741,15	21,03%	1027,8	1006,25	2,10%	
CP13W800	950,7	793,99	16,48%	1031,0	1077,98	-4,56%	
CP13W870	955,8	783,18	18,06%	1036,3	1063,30	-2,61%	
CP15W1040	1222,3	1026,11	16,05%	1310,0	1393,12	-6,35%	
CP15W1030	1238,7	1036,39	16,33%	1327,5	1407,08	-5,99%	
CP15W1000	1279,3	1072,47	16,17%	1371,1	1456,07	-6,20%	

Grupo 2	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	CP02W91	111,2	111,22	-0,02%	148,4	143,66	3,19%
CP04W190	175,1	145,87	16,69%	226,3	188,42	16,74%	
CP05W140	109,0	99,58	8,64%	143,8	128,63	10,55%	
CP08W360	233,6	202,27	13,41%	302,9	261,27	13,74%	
CP05W90	152,6	148,38	2,77%	200,6	191,66	4,46%	
CP08W450	311,5	294,17	5,56%	402,7	379,98	5,64%	
CP13W720	186,5	203,36	-9,04%	239,5	262,68	-9,68%	
CP05W230	298,6	267,56	10,40%	383,3	345,60	9,83%	
CP10W580	423,1	414,72	1,98%	538,0	535,70	0,43%	
CP06W331	418,5	476,13	-13,77%	505,2	615,01	-21,74%	
CP07W330	423,3	511,71	-20,89%	511,6	660,97	-29,20%	
CP07W1020	465,3	560,08	-20,37%	564,7	723,45	-28,11%	
CP07W440	472,1	603,98	-27,94%	572,2	780,16	-36,34%	

Grupo 3	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	CP01W92	58,6	59,96	-2,33%	79,0	85,10	-7,72%
CP06W420	64,6	51,60	20,13%	88,8	73,23	17,54%	
CP10W610	85,7	92,72	-8,20%	113,7	131,60	-15,74%	
CP13W830	71,9	83,66	-16,35%	95,8	118,73	-23,93%	
CP15W960	51,4	50,79	1,18%	70,6	72,09	-2,11%	
CP15W980	41,2	50,10	-21,60%	59,2	71,11	-20,11%	
CP16W1060	80,0	87,61	-9,51%	105,7	124,34	-17,64%	
CP16W1070	48,1	46,97	2,35%	65,1	66,66	-2,40%	

Grupo 4	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	CP12W680	161,1	159,78	0,82%	211,5	212,87	-0,65%
CP13W820	111,0	113,22	-2,00%	149,0	150,84	-1,24%	
CP14W950	336,3	327,69	2,56%	433,0	436,58	-0,83%	
CP16W1050	123,6	121,60	1,62%	154,0	162,01	-5,20%	
CP15W930	369,5	314,02	15,02%	468,8	418,37	10,76%	
CP15W920	395,3	528,17	-33,61%	509,4	703,68	-38,14%	

Grupo 5	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	CP02W141	72,4	70,58	2,51%	95,8	96,33	-0,55%
CP03W150	112,6	118,89	-5,59%	147,7	162,27	-9,87%	
CP04W280	150,2	143,34	4,56%	193,2	195,64	-1,26%	
CP09W530	127,9	139,11	-8,77%	166,5	189,87	-14,03%	
CP12W710	100,8	99,15	1,64%	132,7	135,33	-1,98%	
CP12W821	89,0	88,46	0,61%	116,4	120,73	-3,72%	
CP14W860	212,2	228,37	-7,62%	274,0	311,69	-13,76%	

Tabla 5.19. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.

Grupo 1	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	CP10W600	1015,3	990,89	2,40%	1098,3	1102,06	-0,34%
CP11W630	1110,2	1046,41	5,75%	1229,4	1163,80	5,34%	
CP11W740	1249,5	1181,46	5,45%	1438,6	1314,01	8,66%	
CP13W800	1249,7	1265,69	-1,28%	1426,8	1407,68	1,34%	
CP13W870	1250,1	1248,45	0,13%	1427,6	1388,51	2,74%	
CP15W1040	1530,1	1635,71	-6,90%	1738,1	1819,21	-4,67%	
CP15W1030	1542,0	1652,09	-7,14%	1748,9	1837,44	-5,06%	
CP15W1000	1579,6	1709,61	-8,23%	1782,4	1901,41	-6,68%	

Grupo 2	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	CP02W91	211,4	186,55	11,76%	262,8	218,99	16,67%
CP04W190	311,2	244,67	21,38%	381,2	287,22	24,65%	
CP05W140	202,2	167,03	17,40%	248,8	196,07	21,19%	
CP08W360	417,8	339,27	18,80%	509,6	398,27	21,85%	
CP05W90	274,7	248,88	9,40%	338,0	292,16	13,56%	
CP08W450	538,8	493,41	8,42%	653,3	579,22	11,34%	
CP13W720	321,5	341,10	-6,10%	391,2	400,42	-2,36%	
CP05W230	490,1	448,77	8,43%	586,1	526,82	10,11%	
CP10W580	681,4	695,62	-2,09%	809,7	816,59	-0,85%	
CP06W331	613,2	798,61	-30,24%	688,5	937,49	-36,16%	
CP07W330	618,2	858,29	-38,84%	692,7	1007,55	-45,45%	
CP07W1020	674,0	939,41	-39,38%	750,4	1102,78	-46,96%	
CP07W440	680,4	1013,06	-48,89%	754,9	1189,24	-57,54%	

Grupo 3	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	CP01W92	116,7	118,33	-1,40%	145,7	143,47	1,53%
CP06W420	132,7	101,82	23,27%	165,1	123,45	25,22%	
CP10W610	165,6	182,99	-10,50%	205,0	221,86	-8,22%	
CP13W830	140,0	165,09	-17,92%	173,7	200,17	-15,24%	
CP15W960	105,3	100,24	4,81%	130,5	121,53	6,87%	
CP15W980	92,9	98,87	-6,43%	118,3	119,88	-1,33%	
CP16W1060	152,5	172,90	-13,38%	187,9	209,63	-11,56%	
CP16W1070	95,9	92,69	3,34%	118,4	112,38	5,08%	

Grupo 4	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	CP12W680	296,9	283,06	4,66%	365,5	336,15	8,03%
CP13W820	213,5	200,58	6,05%	265,9	238,20	10,42%	
CP14W950	592,1	580,53	1,95%	717,7	689,43	3,94%	
CP16W1050	218,0	215,42	1,18%	269,9	255,83	5,21%	
CP15W930	614,6	556,31	9,48%	736,4	660,66	10,29%	
CP15W920	667,3	935,69	-40,22%	799,7	1111,20	-38,95%	

Grupo 5	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	CP02W141	139,0	130,37	6,21%	171,8	156,12	9,13%
CP03W150	211,8	219,61	-3,69%	260,3	262,99	-1,03%	
CP04W280	273,3	264,77	3,12%	335,7	317,07	5,55%	
CP09W530	239,1	256,96	-7,47%	295,9	307,71	-3,99%	
CP12W710	190,8	183,15	4,01%	235,0	219,32	6,67%	
CP12W821	166,2	163,40	1,69%	204,0	195,67	4,08%	
CP14W860	385,1	421,83	-9,54%	468,8	505,15	-7,75%	

Tabla 5.20. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.

Si bien, los resultados a los que se llegó para la recurrencia de 2 años mostraban una buena aproximación, salvo casos puntuales; al ver los caudales obtenidos para todas las recurrencias que se consideraron dentro de este estudio, y tomando un margen de error aceptable entre los caudales resultado de la modelación y los calculados en base al procedimiento descrito en los párrafos anteriores de $\pm 20\%$, el número de casos que excedían este límite se vio incrementado, principalmente en varias cuencas pertenecientes al Grupo 2 y algunas dentro de los Grupos 1, 3 y 4.

Del análisis de las subcuencas en que se llegaba a estos errores se pudieron hacer las siguientes observaciones:

- En el Grupo 1: la subcuenca CP11W740 dio un error apenas por encima del margen aceptado, y al no tener ninguna característica particular de entre los parámetros que la hiciera distinguirse del resto del grupo, se decidió no tomar ninguna acción sobre ella.
- En el Grupo 2: las subcuencas CP04W190, CP05W140 y CP08W360 daban errores cercanos al margen y sólo para las recurrencias mayores, por lo que se optó por mantenerlas en el grupo. Por el contrario, las subcuencas CP06W331, CP07W330, CP07W1020 y CP07W440 dieron errores altos para cuatro de las seis recurrencias estudiadas. Por ello, tratándose además de las cuatro cuencas de mayor tamaño del grupo 2, y también viendo la posición que estas ocupaban en el dendograma de la figura 5.19 y del cual a continuación se muestra la posición de las subcuencas mencionadas dentro del grupo (Figura 5.22 – las subcuencas a la izquierda integran el grupo 1 mientras que las de la derecha forman el grupo 2; las subcuencas que daban los mayores errores son la 31, 32, 33 y 34 que junto con la 28 (CP05W230) formaban un subgrupo dentro del Grupo 2) se decidió reubicarlas dentro del grupo 1, el cual contenía las cuencas de mayor área.

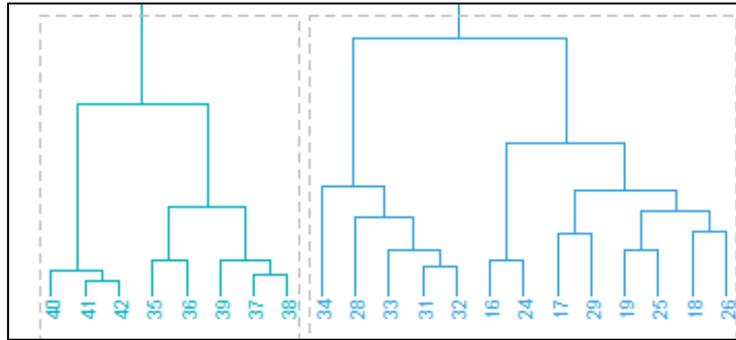


Figura 5.22. Clústeres correspondientes a los Grupos 1 y 2.

- En el Grupo 3: se daban errores en las cuencas CP06W420, CP13W830 y CP15W980, pero solamente en la primera y la última se dan para varias recurrencias y de valores importantes por lo que se consideró reubicarlas en otros grupos en función de sus características. Sin nada en particular que las diferenciara se decidió calcular sus caudales mediante las fórmulas obtenidas para los demás grupos, de lo cual no se llegó a ningún resultado favorable.
- En el Grupo 4: los errores ocurrían en las subcuencas CP15W930 para la recurrencia de 5 años, y en la CP15W920 para varias recurrencias, por lo que con esta última se trabajó de igual manera que con las del grupo 3, probando la validez de sus resultados a partir de las demás ecuaciones, pero el resultado fue el mismo, sin reducirse el error.

Es importante aclarar que, a partir de aquí, dado los resultados poco convincentes e inclusive erráticos para algunas recurrencias de las subcuencas CP06W420 y CP15W980 del Grupo 3 y la CP15W920 del Grupo 4, se decidió descartarlas del análisis de subcuencas (aunque se mantienen dentro de los listados, y se indican en amarillo de aquí en adelante). Posteriormente, dentro del Capítulo 5 se profundiza en las razones por las que se descartan y los posibles orígenes de la dispersión de sus resultados.

A partir de lo anterior, se procedió a reubicar las cuencas con mayores errores del grupo 2 dentro del grupo 1 y se volvieron a realizar los procedimientos estadísticos para la determinación de fórmulas de caudales. Con ellas se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación (Tablas 5.21 a 5.25).

Grupo 1:

$$\log Q = 2,7246 + 1,0358 * \log A + 1,2309 * \log S + 0,1473 * \log PMA$$

Grupo 1	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP06W331	209,60	2,30	199,00	5,06%	5,06%
	CP07W330	211,20	2,32	208,36	1,35%	1,35%
	CP07W1020	233,20	2,37	234,44	-0,53%	0,53%
	CP07W440	233,90	2,38	240,49	-2,82%	2,82%
	CP10W600	382,70	2,60	395,27	-3,28%	3,28%
	CP11W630	417,10	2,61	410,17	1,66%	1,66%
	CP11W740	444,50	2,66	461,91	-3,92%	3,92%
	CP13W800	454,80	2,68	483,81	-6,38%	6,38%
	CP13W870	461,40	2,68	483,01	-4,68%	4,68%
	CP15W1040	620,30	2,78	603,48	2,71%	2,71%
	CP15W1030	640,20	2,79	612,82	4,28%	4,28%
CP15W1000	666,80	2,80	633,58	4,98%	4,98%	

Tabla 5.21. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 1.

Grupo 2:

$$\log Q = 0,72861 + 1,17090 * \log A + 0,70794 * \log S + 0,08520 * \log PMA$$

Grupo 2	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP02W91	42,60	1,66	46,03	-8,05%	8,05%
	CP04W190	65,20	1,80	63,11	3,21%	3,21%
	CP05W140	40,00	1,60	40,13	-0,31%	0,31%
	CP08W360	90,30	1,92	83,92	7,06%	7,06%
	CP05W90	63,90	1,81	64,00	-0,16%	0,16%
	CP08W450	123,00	2,10	126,80	-3,09%	3,09%
	CP13W720	87,50	1,93	85,90	1,82%	1,82%
	CP05W230	126,00	2,08	120,80	4,13%	4,13%
	CP10W580	176,60	2,27	186,41	-5,55%	5,55%

Tabla 5.22. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 2.

Grupo 3:

$$\log Q = -3,8600 + 0,7383 * \log A + 0,6420 * \log S + 2,7287 * \log PMA$$

Grupo 3	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP01W92	19,10	1,28	18,98	0,65%	0,65%
	CP06W420	20,80	1,25	17,64	15,19%	15,19%
	CP10W610	29,70	1,46	29,01	2,34%	2,34%
	CP13W830	24,30	1,42	26,10	-7,39%	7,39%
	CP15W960	16,70	1,24	17,19	-2,94%	2,94%
	CP15W980	10,50	1,23	17,06	-62,44%	62,44%
	CP16W1060	28,50	1,44	27,31	4,16%	4,16%
CP16W1070	16,30	1,20	15,82	2,92%	2,92%	

Tabla 5.23. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 3.

Grupo 4:

$$\log Q = 3,6998 + 1,4790 * \log A - 0,3880 * \log S - 3,4039 * \log PMA$$

Grupo 4	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP12W680	69,40	1,84	69,09	0,45%	0,45%
	CP13W820	38,90	1,62	41,91	-7,74%	7,74%
	CP14W950	136,70	2,17	148,56	-8,68%	8,68%
	CP16W1050	48,10	1,65	44,69	7,09%	7,09%
	CP15W930	155,20	2,16	143,24	7,71%	7,71%
	CP15W920	173,30	2,44	277,57	-60,16%	60,16%

Tabla 5.24. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 4.

Grupo 5:

$$\log Q = 3,3935 + 1,2270 * \log A + 0,4734 * \log S - 1,6548 * \log PMA$$

Grupo 5	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP02W141	25,60	1,41	25,71	-0,43%	0,43%
	CP03W150	41,60	1,64	43,31	-4,11%	4,11%
	CP04W280	57,40	1,72	52,21	9,03%	9,03%
	CP09W530	46,10	1,70	50,67	-9,92%	9,92%
	CP12W710	36,50	1,56	36,12	1,05%	1,05%
	CP12W821	33,10	1,51	32,22	2,65%	2,65%
	CP14W860	83,80	1,92	83,19	0,73%	0,73%

Tabla 5.25. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 5.

Con los nuevos resultados de caudales para dos años de recurrencia, siguiendo los mismos pasos, se hizo el cálculo de los nuevos índices de creciente por grupo y recurrencia, los cuales se muestran en la tabla 5.26.

Grupo	Recurrencias (Años)				
	5	10	20	50	100
Grupo 1	1,64	1,97	2,29	2,72	3,04
Grupo 2	1,69	2,52	3,34	4,44	5,26
Grupo 3	1,82	3,03	4,25	5,85	7,06
Grupo 4	1,69	2,55	3,42	4,56	5,43
Grupo 5	1,74	2,75	3,75	5,07	6,07

Tabla 5.26. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.

De los caudales obtenidos por las fórmulas y los índices de creciente se calcularon valores de caudales para las demás recurrencias, repitiendo la comparación con los caudales de la modelación (Tablas 5.27 a 5.29).

	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	209,6	199,0	5,06%	338,4	327,29
CP07W330		211,2	208,4	1,35%	342,1	342,68	-0,17%
CP07W1020		233,2	234,4	-0,53%	380,7	385,57	-1,28%
CP07W440		233,9	240,5	-2,82%	386,1	395,52	-2,44%
CP10W600		382,7	395,3	-3,28%	618,3	650,08	-5,14%
CP11W630		417,1	410,2	1,66%	680,9	674,59	0,93%
CP11W740		444,5	461,9	-3,92%	742,7	759,69	-2,29%
CP13W800		454,8	483,8	-6,38%	756,0	795,70	-5,25%
CP13W870		461,4	483,0	-4,68%	760,7	794,38	-4,43%
CP15W1040		620,3	603,5	2,71%	993,2	992,52	0,07%
CP15W1030		640,2	612,8	4,28%	1011,1	1007,88	0,32%
CP15W1000	666,8	633,6	4,98%	1047,5	1042,03	0,52%	
Grupo 2	CP02W91	42,6	46,0	-8,05%	76,4	77,75	-1,77%
	CP04W190	65,2	63,1	3,21%	122,5	106,60	12,98%
	CP05W140	40,0	40,1	-0,31%	76,0	67,78	10,82%
	CP08W360	90,3	83,9	7,06%	166,0	141,76	14,60%
	CP05W90	63,9	64,0	-0,16%	108,2	108,11	0,09%
	CP08W450	123,0	126,8	-3,09%	221,5	214,19	3,30%
	CP13W720	87,5	85,9	1,82%	142,2	145,11	-2,04%
	CP05W230	126,0	120,8	4,13%	215,3	204,06	5,22%
	CP10W580	176,6	186,4	-5,55%	307,4	314,88	-2,43%
Grupo 3	CP01W92	19,1	19,0	0,65%	39,8	34,56	13,15%
	CP06W420	20,8	17,6	15,19%	43,8	32,13	26,64%
	CP10W610	29,7	29,0	2,34%	59,2	52,83	10,75%
	CP13W830	24,3	26,1	-7,39%	49,3	47,53	3,59%
	CP15W960	16,7	17,2	-2,94%	35,0	31,31	10,53%
	CP15W980	10,5	17,1	-62,44%	26,1	31,07	-19,03%
	CP16W1060	28,5	27,3	4,16%	55,8	49,75	10,84%
	CP16W1070	16,3	15,8	2,92%	33,2	28,82	13,18%
Grupo 4	CP12W680	69,4	69,1	0,45%	121,0	116,52	3,71%
	CP13W820	38,9	41,9	-7,74%	75,2	70,68	6,01%
	CP14W950	136,7	148,6	-8,68%	243,0	250,54	-3,10%
	CP16W1050	48,1	44,7	7,09%	89,5	75,36	15,79%
	CP15W930	155,2	143,2	7,71%	269,7	241,56	10,43%
	CP15W920	173,3	277,6	-60,16%	290,3	468,10	-61,25%
Grupo 5	CP02W141	25,6	25,7	-0,43%	50,3	44,83	10,88%
	CP03W150	41,6	43,3	-4,11%	79,3	75,52	4,77%
	CP04W280	57,4	52,2	9,03%	106,6	91,05	14,59%
	CP09W530	46,1	50,7	-9,92%	89,1	88,36	0,83%
	CP12W710	36,5	36,1	1,05%	70,5	62,98	10,67%
	CP12W821	33,1	32,2	2,65%	62,8	56,19	10,53%
	CP14W860	83,8	83,2	0,73%	152,6	145,05	4,95%

Tabla 5.27. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.

	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	418,5	391,51	6,45%	505,2	455,73
CP07W330		423,3	409,92	3,16%	511,6	477,16	6,73%
CP07W1020		465,3	461,22	0,88%	564,7	536,88	4,93%
CP07W440		472,1	473,13	-0,22%	572,2	550,74	3,75%
CP10W600		740,1	777,64	-5,07%	878,8	905,19	-3,00%
CP11W630		811,1	806,95	0,51%	986,2	939,32	4,75%
CP11W740		938,5	908,75	3,17%	1027,8	1057,82	-2,92%
CP13W800		950,7	951,83	-0,12%	1031,0	1107,96	-7,46%
CP13W870		955,8	950,25	0,58%	1036,3	1106,12	-6,74%
CP15W1040		1222,3	1187,27	2,87%	1310,0	1382,02	-5,50%
CP15W1030		1238,7	1205,64	2,67%	1327,5	1403,40	-5,72%
CP15W1000	1279,3	1246,49	2,56%	1371,1	1450,96	-5,82%	
Grupo 2	CP02W91	111,2	115,83	-4,16%	148,4	153,90	-3,71%
	CP04W190	175,1	158,80	9,31%	226,3	211,00	6,76%
	CP05W140	109,0	100,97	7,37%	143,8	134,16	6,70%
	CP08W360	233,6	211,18	9,60%	302,9	280,60	7,36%
	CP05W90	152,6	161,05	-5,54%	200,6	213,99	-6,67%
	CP08W450	311,5	319,08	-2,43%	402,7	423,97	-5,28%
	CP13W720	186,5	216,17	-15,91%	239,5	287,22	-19,93%
	CP05W230	298,6	303,98	-1,80%	383,3	403,91	-5,38%
	CP10W580	423,1	469,08	-10,87%	538,0	623,27	-15,85%
Grupo 3	CP01W92	58,6	57,58	1,73%	79,0	80,60	-2,03%
	CP06W420	64,6	53,53	17,14%	88,8	74,93	15,62%
	CP10W610	85,7	88,02	-2,71%	113,7	123,21	-8,36%
	CP13W830	71,9	79,19	-10,14%	95,8	110,84	-15,70%
	CP15W960	51,4	52,17	-1,49%	70,6	73,02	-3,43%
	CP15W980	41,2	51,76	-25,63%	59,2	72,45	-22,38%
	CP16W1060	80,0	82,89	-3,61%	105,7	116,03	-9,77%
	CP16W1070	48,1	48,02	0,16%	65,1	67,22	-3,26%
Grupo 4	CP12W680	161,1	176,29	-9,43%	211,5	236,06	-11,61%
	CP13W820	111,0	106,94	3,66%	149,0	143,20	3,89%
	CP14W950	336,3	379,06	-12,72%	433,0	507,59	-17,23%
	CP16W1050	123,6	114,03	7,75%	154,0	152,69	0,85%
	CP15W930	369,5	365,48	1,09%	468,8	489,40	-4,39%
	CP15W920	395,3	708,22	-79,16%	509,4	948,35	-86,17%
Grupo 5	CP02W141	72,4	70,58	2,51%	95,8	96,33	-0,55%
	CP03W150	112,6	118,89	-5,59%	147,7	162,27	-9,87%
	CP04W280	150,2	143,34	4,56%	193,2	195,64	-1,26%
	CP09W530	127,9	139,11	-8,77%	166,5	189,87	-14,03%
	CP12W710	100,8	99,15	1,64%	132,7	135,33	-1,98%
	CP12W821	89,0	88,46	0,61%	116,4	120,73	-3,72%
	CP14W860	212,2	228,37	-7,62%	274,0	311,69	-13,76%

Tabla 5.28. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.

	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	613,2	540,62	11,84%	688,5	604,84
CP07W330		618,2	566,04	8,44%	692,7	633,28	8,58%
CP07W1020		674,0	636,89	5,51%	750,4	712,54	5,04%
CP07W440		680,4	653,33	3,98%	754,9	730,94	3,17%
CP10W600		1015,3	1073,81	-5,76%	1098,3	1201,37	-9,38%
CP11W630		1110,2	1114,30	-0,37%	1229,4	1246,66	-1,40%
CP11W740		1249,5	1254,87	-0,43%	1438,6	1403,93	2,41%
CP13W800		1249,7	1314,35	-5,17%	1426,8	1470,48	-3,06%
CP13W870		1250,1	1312,17	-4,97%	1427,6	1468,04	-2,83%
CP15W1040		1530,1	1639,47	-7,15%	1738,1	1834,22	-5,53%
CP15W1030		1542,0	1664,83	-7,97%	1748,9	1862,59	-6,50%
CP15W1000	1579,6	1721,24	-8,97%	1782,4	1925,71	-8,04%	
Grupo 2	CP02W91	211,4	204,23	3,39%	262,8	242,31	7,80%
	CP04W190	311,2	280,01	10,02%	381,2	332,21	12,85%
	CP05W140	202,2	178,04	11,95%	248,8	211,23	15,10%
	CP08W360	417,8	372,37	10,87%	509,6	441,79	13,31%
	CP05W90	274,7	283,97	-3,37%	338,0	336,91	0,32%
	CP08W450	538,8	562,63	-4,42%	653,3	667,52	-2,18%
	CP13W720	321,5	381,16	-18,56%	391,2	452,22	-15,60%
	CP05W230	490,1	536,01	-9,37%	586,1	635,93	-8,50%
	CP10W580	681,4	827,11	-21,38%	809,7	981,30	-21,19%
Grupo 3	CP01W92	116,7	111,04	4,85%	145,7	134,06	7,99%
	CP06W420	132,7	103,22	22,22%	165,1	124,61	24,52%
	CP10W610	165,6	169,73	-2,49%	205,0	204,91	0,04%
	CP13W830	140,0	152,69	-9,07%	173,7	184,35	-6,13%
	CP15W960	105,3	100,59	4,47%	130,5	121,45	6,94%
	CP15W980	92,9	99,80	-7,43%	118,3	120,49	-1,85%
	CP16W1060	152,5	159,83	-4,81%	187,9	192,96	-2,70%
	CP16W1070	95,9	92,60	3,44%	118,4	111,79	5,58%
Grupo 4	CP12W680	296,9	315,07	-6,12%	365,5	374,84	-2,56%
	CP13W820	213,5	191,13	10,48%	265,9	227,39	14,48%
	CP14W950	592,1	677,49	-14,42%	717,7	806,01	-12,30%
	CP16W1050	218,0	203,79	6,52%	269,9	242,45	10,17%
	CP15W930	614,6	653,21	-6,28%	736,4	777,13	-5,53%
	CP15W920	667,3	1265,78	-89,69%	799,7	1505,91	-88,31%
Grupo 5	CP02W141	139,0	130,37	6,21%	171,8	156,12	9,13%
	CP03W150	211,8	219,61	-3,69%	260,3	262,99	-1,03%
	CP04W280	273,3	264,77	3,12%	335,7	317,07	5,55%
	CP09W530	239,1	256,96	-7,47%	295,9	307,71	-3,99%
	CP12W710	190,8	183,15	4,01%	235,0	219,32	6,67%
	CP12W821	166,2	163,40	1,69%	204,0	195,67	4,08%
	CP14W860	385,1	421,83	-9,54%	468,8	505,15	-7,75%

Tabla 5.29. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.

Del análisis de estos resultados se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En el Grupo 1: la incorporación de las subcuencas CP06W331, CP07W330, CP07W1020 y CP07W440 provenientes del grupo 2 resultó de buena manera, no presentando éstas errores por encima de los admisibles ($\pm 20 \%$) y además reduciendo el de la única que originalmente lo excedía, no teniendo finalmente ningún error excesivo dentro del grupo.
- En el Grupo 2: la salida de las cuencas mencionadas en el párrafo anterior mejoró el ajuste de la ecuación al resto de las subcuencas del grupo, quedando solamente una de ellas (CP15W580) con errores apenas por encima de la tolerancia.
- En el Grupo 3: la no consideración de las cuencas indicadas en amarillo mejoró los valores del grupo, teniendo errores en general por debajo o en torno al 10 %.
- En el Grupo 4: similar al grupo anterior, los resultados generan errores un poco mayores, pero siempre por debajo de los admisibles.
- En el Grupo 5: el grupo no sufrió modificaciones, por lo que mantiene buenos resultados desde el primer análisis.

El paso siguiente fue determinar las características que regían en cada uno de los grupos definidos. Del análisis de los parámetros y principalmente de los intervinientes en las ecuaciones de caudales, se pudieron observar de manera relativamente sencilla los casos donde la forma o tamaño de las subcuencas era un común denominador del grupo. Pero dos de ellos, los Grupos 3 y 5, no presentaban este "rasgo" característico, en particular que los diferenciase entre sí. Los rangos de variación de los parámetros de las subcuencas que los componían estaban en cierta manera superpuestos.

Atendiendo a esto y a fin de dar una caracterización tan precisa como sea posible de los grupos, se procedió a hacer un tercer análisis de agrupamiento, en el que los Grupos 1, 2 y 4 se mantuvieron sin modificaciones, y los Grupos 3 y 5 se combinaron dentro del Grupo 3.

A continuación, se muestran los resultados de éste análisis, incluyendo las curvas de Andrews de cada grupo (Figuras 5.23 a 5.26); las fórmulas de caudales para la recurrencia de 2 años; la comparación entre los caudales modelados y los obtenidos con las ecuaciones (Tablas 5.30 a 5.33); los índices de creciente para el nuevo agrupamiento (Tabla 5.34); y por último la comparación entre los caudales para todas las recurrencias obtenidos mediante modelación con los calculados con las fórmulas para 2 años de recurrencia amplificadas con los índices de creciente (Tablas 5.35 a 5.37).

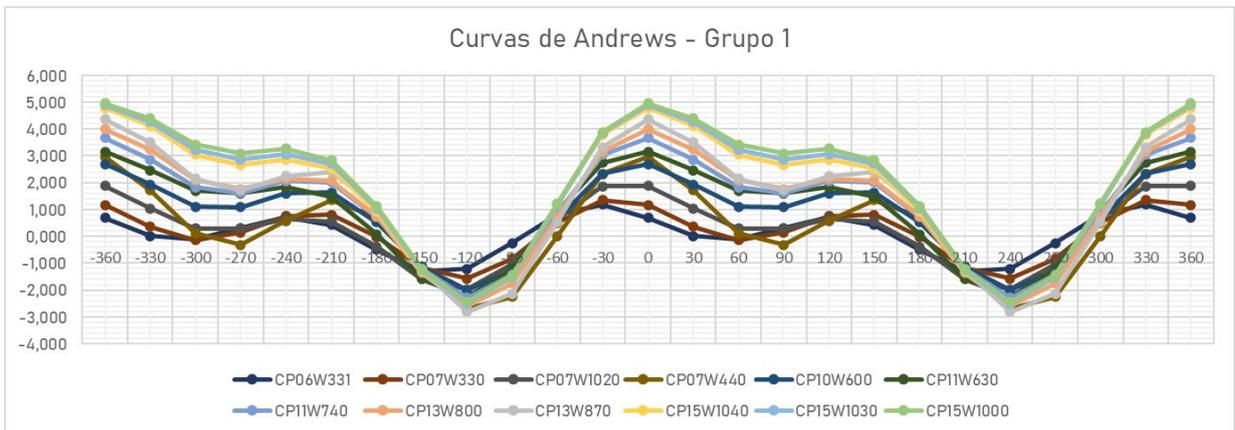


Figura 5.23. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 1.

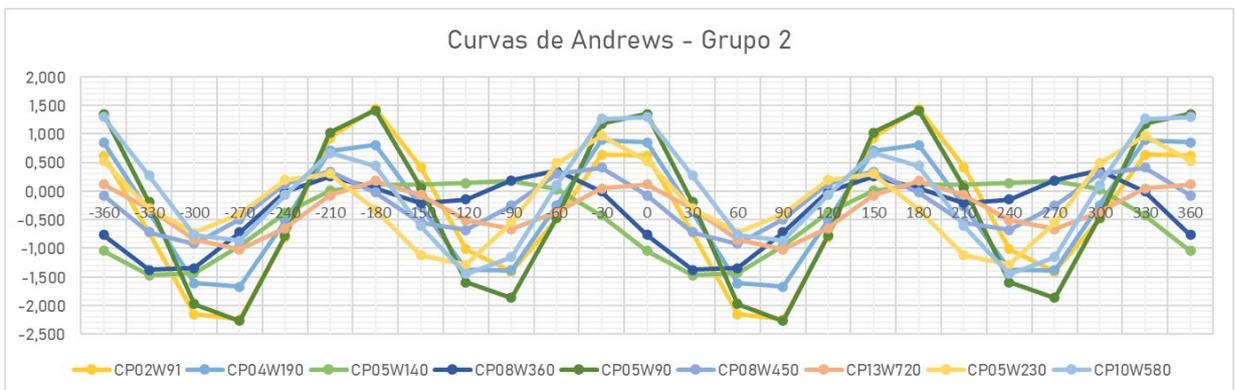


Figura 5.24. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 2.

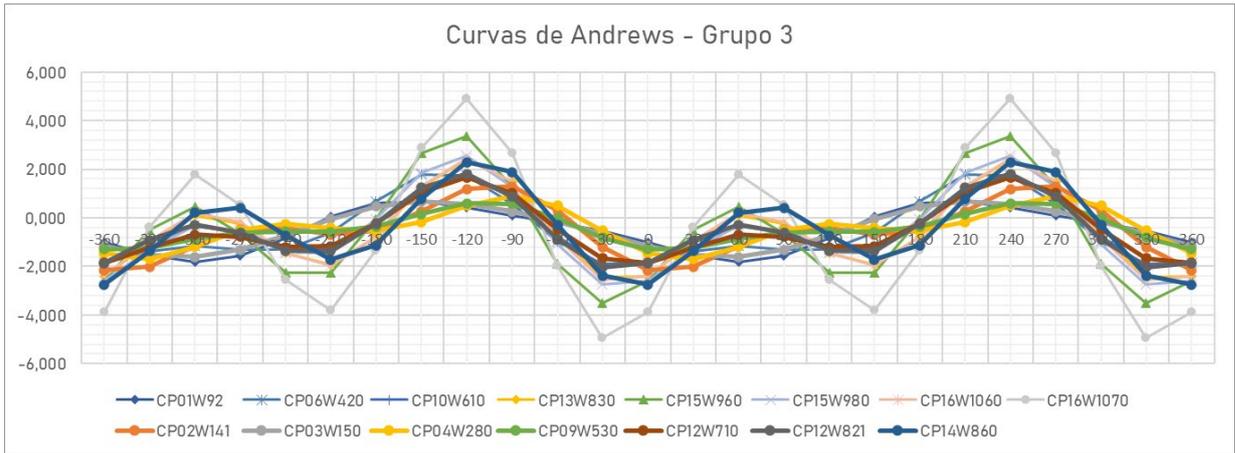


Figura 5.25. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 3.

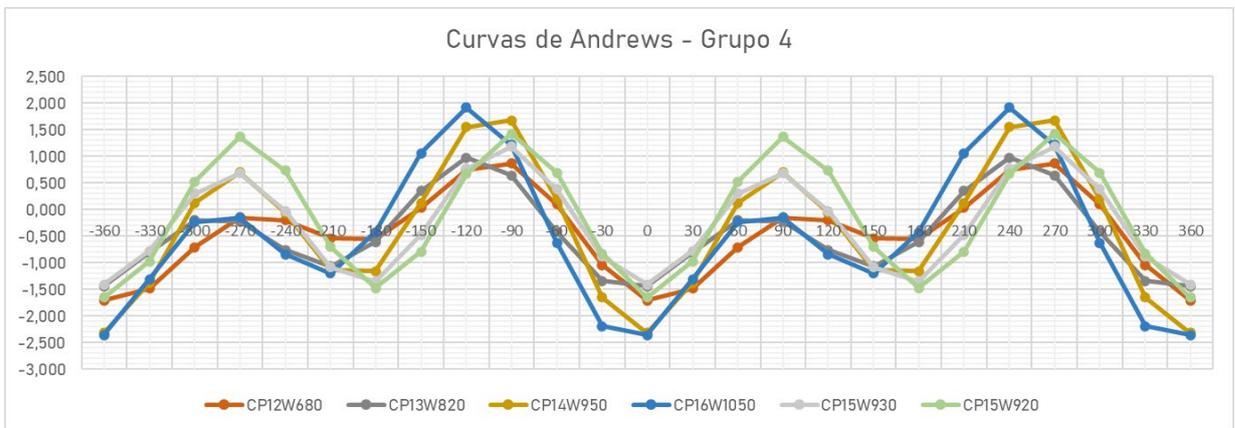


Figura 5.26. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 4.

Grupo 1:

$$\log Q = 2,7246 + 1,0358 * \log A + 1,2309 * \log S + 0,1473 * \log PMA$$

Grupo 1	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP06W331	209,60	2,30	199,00	5,06%	5,06%
	CP07W330	211,20	2,32	208,36	1,35%	1,35%
	CP07W1020	233,20	2,37	234,44	-0,53%	0,53%
	CP07W440	233,90	2,38	240,49	-2,82%	2,82%
	CP10W600	382,70	2,60	395,27	-3,28%	3,28%
	CP11W630	417,10	2,61	410,17	1,66%	1,66%
	CP11W740	444,50	2,66	461,91	-3,92%	3,92%
	CP13W800	454,80	2,68	483,81	-6,38%	6,38%
	CP13W870	461,40	2,68	483,01	-4,68%	4,68%
	CP15W1040	620,30	2,78	603,48	2,71%	2,71%
	CP15W1030	640,20	2,79	612,82	4,28%	4,28%
CP15W1000	666,80	2,80	633,58	4,98%	4,98%	

Tabla 5.30. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 1.

Grupo 2:

$$\log Q = 0,72861 + 1,17090 * \log A + 0,70794 * \log S + 0,08520 * \log PMA$$

Grupo 2	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP02W91	42,60	1,66	46,03	-8,05%	8,05%
	CP04W190	65,20	1,80	63,11	3,21%	3,21%
	CP05W140	40,00	1,60	40,13	-0,31%	0,31%
	CP08W360	90,30	1,92	83,92	7,06%	7,06%
	CP05W90	63,90	1,81	64,00	-0,16%	0,16%
	CP08W450	123,00	2,10	126,80	-3,09%	3,09%
	CP13W720	87,50	1,93	85,90	1,82%	1,82%
	CP05W230	126,00	2,08	120,80	4,13%	4,13%
	CP10W580	176,60	2,27	186,41	-5,55%	5,55%

Tabla 5.31. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 2.

Grupo 3:

$$\log Q = 1,4367 + 1,3101 * \log A + 0,5656 * \log S - 0,6524 * \log PMA$$

Grupo 3	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP01W92	19,10	1,33	21,54	-12,77%	12,77%
	CP06W420	20,80	1,42	26,06	-25,31%	25,31%
	CP10W610	29,70	1,53	33,72	-13,55%	13,55%
	CP13W830	24,30	1,41	25,88	-6,48%	6,48%
	CP15W960	16,70	1,28	19,05	-14,05%	14,05%
	CP15W980	10,50	1,34	21,94	-108,94%	108,94%
	CP16W1060	28,50	1,44	27,69	2,85%	2,85%
	CP16W1070	16,30	1,16	14,55	10,75%	10,75%
	CP02W141	25,60	1,36	23,03	10,03%	10,03%
	CP03W150	41,60	1,60	40,07	3,69%	3,69%
	CP04W280	57,40	1,72	52,59	8,39%	8,39%
	CP09W530	46,10	1,71	51,65	-12,04%	12,04%
	CP12W710	36,50	1,53	33,83	7,32%	7,32%
	CP12W821	33,10	1,48	30,17	8,86%	8,86%
	CP14W860	83,80	1,92	82,93	1,04%	1,04%

Tabla 5.32. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 3.

Grupo 4:

$$\log Q = 3,6998 + 1,4790 * \log A - 0,3880 * \log S - 3,4039 * \log PMA$$

Grupo 4	Nombres	Q _{2años}	Log Q	Q	Error	Valor Abs
	CP12W680	69,40	1,84	69,09	0,45%	0,45%
	CP13W820	38,90	1,62	41,91	-7,74%	7,74%
	CP14W950	136,70	2,17	148,56	-8,68%	8,68%
	CP16W1050	48,10	1,65	44,69	7,09%	7,09%
	CP15W930	155,20	2,16	143,24	7,71%	7,71%
	CP15W920	173,30	2,44	277,57	-60,16%	60,16%

Tabla 5.33 – Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 4.

Grupo	Recurrencia (años)				
	5	10	20	50	100
Grupo 1	1,64	1,97	2,29	2,72	3,04
Grupo 2	1,69	2,52	3,34	4,44	5,26
Grupo 3	1,78	2,88	3,98	5,43	6,53
Grupo 4	1,69	2,55	3,42	4,56	5,43

Tabla 5.34. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.

	Subcuenca	Q2años Modelacion HEC-HMS	Q2años con formula	Error %	Q5años Modelacion HEC-HMS	Q5años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	209,6	199,0	5,06%	338,4	327,29
CP07W330		211,2	208,4	1,35%	342,1	342,68	-0,17%
CP07W1020		233,2	234,4	-0,53%	380,7	385,57	-1,28%
CP07W440		233,9	240,5	-2,82%	386,1	395,52	-2,44%
CP10W600		382,7	395,3	-3,28%	618,3	650,08	-5,14%
CP11W630		417,1	410,2	1,66%	680,9	674,59	0,93%
CP11W740		444,5	461,9	-3,92%	742,7	759,69	-2,29%
CP13W800		454,8	483,8	-6,38%	756,0	795,70	-5,25%
CP13W870		461,4	483,0	-4,68%	760,7	794,38	-4,43%
CP15W1040		620,3	603,5	2,71%	993,2	992,52	0,07%
CP15W1030		640,2	612,8	4,28%	1011,1	1007,88	0,32%
CP15W1000		666,8	633,6	4,98%	1047,5	1042,03	0,52%
Grupo 2	CP02W91	42,6	46,0	-8,05%	76,4	77,75	-1,77%
	CP04W190	65,2	63,1	3,21%	122,5	106,60	12,98%
	CP05W140	40,0	40,1	-0,31%	76,0	67,78	10,82%
	CP08W360	90,3	83,9	7,06%	166,0	141,76	14,60%
	CP05W90	63,9	64,0	-0,16%	108,2	108,11	0,09%
	CP08W450	123,0	126,8	-3,09%	221,5	214,19	3,30%
	CP13W720	87,5	85,9	1,82%	142,2	145,11	-2,04%
	CP05W230	126,0	120,8	4,13%	215,3	204,06	5,22%
	CP10W580	176,6	186,4	-5,55%	307,4	314,88	-2,43%
Grupo 3	CP01W92	19,1	21,5	-12,77%	39,8	38,33	3,69%
	CP06W420	20,8	26,1	-25,31%	43,8	46,38	-5,90%
	CP10W610	29,7	33,7	-13,55%	59,2	60,01	-1,38%
	CP13W830	24,3	25,9	-6,48%	49,3	46,05	6,59%
	CP15W960	16,7	19,0	-14,05%	35,0	33,89	3,16%
	CP15W980	10,5	21,9	-108,94%	26,1	39,04	-49,59%
	CP16W1060	28,5	27,7	2,85%	55,8	49,27	11,70%
	CP16W1070	16,3	14,5	10,75%	33,2	25,89	22,02%
	CP02W141	25,6	23,0	10,03%	50,3	40,99	18,51%
	CP03W150	41,6	40,1	3,69%	79,3	71,30	10,09%
	CP04W280	57,4	52,6	8,39%	106,6	93,58	12,21%
	CP09W530	46,1	51,6	-12,04%	89,1	91,91	-3,16%
	CP12W710	36,5	33,8	7,32%	70,5	60,20	14,61%
	CP12W821	33,1	30,2	8,86%	62,8	53,69	14,51%
CP14W860	83,8	82,9	1,04%	152,6	147,59	3,28%	
Grupo 4	CP12W680	69,4	69,1	0,45%	121,0	116,52	3,71%
	CP13W820	38,9	41,9	-7,74%	75,2	70,68	6,01%
	CP14W950	136,7	148,6	-8,68%	243,0	250,54	-3,10%
	CP16W1050	48,1	44,7	7,09%	89,5	75,36	15,79%
	CP15W930	155,2	143,2	7,71%	269,7	241,56	10,43%
	CP15W920	173,3	277,6	-60,16%	290,3	468,10	-61,25%

Tabla 5.36. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.

	Subcuenca	Q10años Modelacion HEC-HMS	Q10años con Indice	Error %	Q20años Modelacion HEC-HMS	Q20años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	418,5	391,51	6,45%	505,2	455,73
CP07W330		423,3	409,92	3,16%	511,6	477,16	6,73%
CP07W1020		465,3	461,22	0,88%	564,7	536,88	4,93%
CP07W440		472,1	473,13	-0,22%	572,2	550,74	3,75%
CP10W600		740,1	777,64	-5,07%	878,8	905,19	-3,00%
CP11W630		811,1	806,95	0,51%	986,2	939,32	4,75%
CP11W740		938,5	908,75	3,17%	1027,8	1057,82	-2,92%
CP13W800		950,7	951,83	-0,12%	1031,0	1107,96	-7,46%
CP13W870		955,8	950,25	0,58%	1036,3	1106,12	-6,74%
CP15W1040		1222,3	1187,27	2,87%	1310,0	1382,02	-5,50%
CP15W1030		1238,7	1205,64	2,67%	1327,5	1403,40	-5,72%
CP15W1000		1279,3	1246,49	2,56%	1371,1	1450,96	-5,82%
Grupo 2	CP02W91	111,2	115,83	-4,16%	148,4	153,90	-3,71%
	CP04W190	175,1	158,80	9,31%	226,3	211,00	6,76%
	CP05W140	109,0	100,97	7,37%	143,8	134,16	6,70%
	CP08W360	233,6	211,18	9,60%	302,9	280,60	7,36%
	CP05W90	152,6	161,05	-5,54%	200,6	213,99	-6,67%
	CP08W450	311,5	319,08	-2,43%	402,7	423,97	-5,28%
	CP13W720	186,5	216,17	-15,91%	239,5	287,22	-19,93%
	CP05W230	298,6	303,98	-1,80%	383,3	403,91	-5,38%
	CP10W580	423,1	469,08	-10,87%	538,0	623,27	-15,85%
Grupo 3	CP01W92	58,6	62,01	-5,82%	79,0	85,69	-8,46%
	CP06W420	64,6	75,03	-16,15%	88,8	103,68	-16,76%
	CP10W610	85,7	97,08	-13,28%	113,7	134,15	-17,99%
	CP13W830	71,9	74,49	-3,60%	95,8	102,94	-7,45%
	CP15W960	51,4	54,83	-6,67%	70,6	75,77	-7,32%
	CP15W980	41,2	63,16	-53,29%	59,2	87,27	-47,42%
	CP16W1060	80,0	79,71	0,37%	105,7	110,14	-4,20%
	CP16W1070	48,1	41,88	12,93%	65,1	57,87	11,10%
	CP02W141	72,4	66,30	8,42%	95,8	91,62	4,36%
	CP03W150	112,6	115,34	-2,43%	147,7	159,38	-7,91%
	CP04W280	150,2	151,38	-0,79%	193,2	209,19	-8,27%
	CP09W530	127,9	148,69	-16,25%	166,5	205,46	-23,40%
	CP12W710	100,8	97,38	3,39%	132,7	134,56	-1,40%
	CP12W821	89,0	86,85	2,42%	116,4	120,01	-3,10%
CP14W860	212,2	238,75	-12,51%	274,0	329,91	-20,40%	
Grupo 4	CP12W680	161,1	176,29	-9,43%	211,5	236,06	-11,61%
	CP13W820	111,0	106,94	3,66%	149,0	143,20	3,89%
	CP14W950	336,3	379,06	-12,72%	433,0	507,59	-17,23%
	CP16W1050	123,6	114,03	7,75%	154,0	152,69	0,85%
	CP15W930	369,5	365,48	1,09%	468,8	489,40	-4,39%
	CP15W920	395,3	708,22	-79,16%	509,4	948,35	-86,17%

Tabla 5.37. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.

	Subcuenca	Q50años Modelacion HEC-HMS	Q50años con Indice	Error %	Q100años Modelacion HEC-HMS	Q100años con Indice	Error %
	Grupo 1	CP06W331	613,2	540,62	11,84%	688,5	604,84
CP07W330		618,2	566,04	8,44%	692,7	633,28	8,58%
CP07W1020		674,0	636,89	5,51%	750,4	712,54	5,04%
CP07W440		680,4	653,33	3,98%	754,9	730,94	3,17%
CP10W600		1015,3	1073,81	-5,76%	1098,3	1201,37	-9,38%
CP11W630		1110,2	1114,30	-0,37%	1229,4	1246,66	-1,40%
CP11W740		1249,5	1254,87	-0,43%	1438,6	1403,93	2,41%
CP13W800		1249,7	1314,35	-5,17%	1426,8	1470,48	-3,06%
CP13W870		1250,1	1312,17	-4,97%	1427,6	1468,04	-2,83%
CP15W1040		1530,1	1639,47	-7,15%	1738,1	1834,22	-5,53%
CP15W1030		1542,0	1664,83	-7,97%	1748,9	1862,59	-6,50%
CP15W1000	1579,6	1721,24	-8,97%	1782,4	1925,71	-8,04%	
Grupo 2	CP02W91	211,4	204,23	3,39%	262,8	242,31	7,80%
	CP04W190	311,2	280,01	10,02%	381,2	332,21	12,85%
	CP05W140	202,2	178,04	11,95%	248,8	211,23	15,10%
	CP08W360	417,8	372,37	10,87%	509,6	441,79	13,31%
	CP05W90	274,7	283,97	-3,37%	338,0	336,91	0,32%
	CP08W450	538,8	562,63	-4,42%	653,3	667,52	-2,18%
	CP13W720	321,5	381,16	-18,56%	391,2	452,22	-15,60%
	CP05W230	490,1	536,01	-9,37%	586,1	635,93	-8,50%
	CP10W580	681,4	827,11	-21,38%	809,7	981,30	-21,19%
	Grupo 3	CP01W92	116,7	116,99	-0,24%	145,7	140,66
CP06W420		132,7	141,56	-6,67%	165,1	170,21	-3,09%
CP10W610		165,6	183,16	-10,60%	205,0	220,23	-7,43%
CP13W830		140,0	140,53	-0,38%	173,7	168,98	2,72%
CP15W960		105,3	103,44	1,77%	130,5	124,38	4,69%
CP15W980		92,9	119,15	-28,26%	118,3	143,27	-21,10%
CP16W1060		152,5	150,37	1,39%	187,9	180,81	3,77%
CP16W1070		95,9	79,01	17,61%	118,4	95,00	19,76%
CP02W141		139,0	125,09	10,01%	171,8	150,40	12,45%
CP03W150		211,8	217,60	-2,74%	260,3	261,64	-0,52%
CP04W280		273,3	285,60	-4,50%	335,7	343,40	-2,29%
CP09W530		239,1	280,51	-17,32%	295,9	337,28	-13,98%
CP12W710		190,8	183,72	3,71%	235,0	220,90	6,00%
CP12W821		166,2	163,85	1,42%	204,0	197,01	3,43%
CP14W860	385,1	450,42	-16,96%	468,8	541,58	-15,52%	
Grupo 4	CP12W680	296,9	315,07	-6,12%	365,5	374,84	-2,56%
	CP13W820	213,5	191,13	10,48%	265,9	227,39	14,48%
	CP14W950	592,1	677,49	-14,42%	717,7	806,01	-12,30%
	CP16W1050	218,0	203,79	6,52%	269,9	242,45	10,17%
	CP15W930	614,6	653,21	-6,28%	736,4	777,13	-5,53%
	CP15W920	667,3	1265,78	-89,69%	799,7	1505,91	-88,31%

Tabla 5.38. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.

De lo expuesto en las anteriores páginas se puede resumir lo siguiente:

- En el Grupo 1: no hubo errores por fuera de la tolerancia.
- En el Grupo 2: solamente la cuenca CP15W580 presenta errores apenas por encima de la tolerancia (-21,38% para 50 años y -21,19% para 100 años).
- En el Grupo 3: la combinación de los grupos 3 y 5 de los análisis anteriores tuvo buenos resultados permitiendo la mejor caracterización de sus subcuencas. Se presentan tres casos por encima de la tolerancia: la subcuenca CP16W1070 (22,02% para 5 años), la CP09W530 (-23,40% para 20 años) y la CP14W860 (-20,40% para 20 años).
- En el Grupo 4: no hubo errores por fuera de la tolerancia.

6. Investigación a nivel provincial

El trabajo se inició con la selección de las cuencas que cumplimentaban con los requisitos de calidad de datos necesarios para el estudio. Luego, se realizó el análisis de las características hidrológicas y físicas, que formaron parte de las variables del análisis estadístico multivariado.

6.1. Información hidrológica

La información hidrológica necesaria para realizar este estudio comprendió los datos de Caudal Máximo Anual y Precipitación Media Areal. El primero fue obtenido de los datos del registro del Sistema Nacional de Información Hídrica para las cuencas aforadas y de los resultados de la modelación para el resto de las subcuencas que se incorporaron al estudio; la Precipitación Media Areal se obtuvo a través del método desarrollado en el proyecto de investigación realizado en la Facultad Regional Paraná Universidad Tecnológica Nacional, denominado "Estudio de tormentas de diseño en cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos"(Lopez et al., 2020).

El análisis de la información hidrológica de las cuencas aforadas se realizó en base al denominado "año hidrológico", el cual, a diferencia del año calendario, se determina en función del período que cubre la temporada con las precipitaciones mayores de una cuenca. Para ello se determina como inicio de este año el mes donde se registran las menores precipitaciones o caudales. Particularmente, en este trabajo el año hidrológico se estableció su inicio el 1 de septiembre y su finalización el 31 de agosto del año siguiente.

6.2. Caudal máximo anual

Los valores de caudales máximos conformaron la variable dependiente a obtener en este estudio, sirviendo además estos valores analizados para verificar los resultados de la aplicación de las fórmulas obtenidas para su estimación.

Para conformar la serie de caudales máximos se incluyeron las cuencas aforadas que contaban con datos de aforo y datos de caudales en estaciones con 20 o más años de registros diarios de caudales.

Dentro de los registros se encontraron situaciones donde la falta de datos generaba incertidumbre sobre la calidad de los datos. Por ejemplo, había casos de información incompleta con inexistencia de registros durante los períodos de mayores precipitaciones o años con falta de 6 meses de registro o más. Debido a que era la variable primordial, los datos que conformaban la serie de caudales, debieron ser analizados y clasificados en base a criterios de aceptación previamente establecidos.

La selección de los caudales máximos se realizó comparando dos datos publicados en el Sistema Nacional de Información Hídrica: el Caudal Instantáneo Máximo (Q_{ins}) y el Caudal Máximo Medio Diario (Q_{md}). Primordialmente, se tomaba el valor del Caudal Instantáneo Máximo y se verificaba con el Caudal Máximo Medio Diario, cuando estos valores discrepaban en gran medida entre sí, o faltaba alguno de los dos para el mismo año, se elegía el que se correspondía mejor con el resto de los datos dentro de un entorno razonable.

Uno de los criterios para formar la serie de caudales máximos fue descartar los datos de los años que contenían seis o más meses sin medición.

En la cuenca del arroyo Nogoyá se tuvo en cuenta un criterio particular para la selección de los datos. El mismo consistió en verificar que los caudales máximos de cada año no correspondieran a niveles de altura elevados del río Paraná, debido a que este puede influir en el caudal del arroyo Nogoyá, principalmente en la zona donde se encuentra su estación de aforo sobre la Ruta Provincial N° 11. Los valores de caudal se calculan con mediciones de altura del arroyo utilizando una curva de correlación Altura-Caudal, en caso de creciente del Paraná las alturas del arroyo Nogoyá en la estación de aforo se deben principalmente a la creciente del río Paraná y no a los caudales del arroyo.

A fin de realizar este análisis, en primera instancia se investigaron los datos de medición de alturas del río Paraná brindados por la Red Hidrológica Nacional en la estación 3050 - Túnel Subfluvial, ubicada sobre el río Paraná en la provincia de Entre Ríos. Se tomó un período de 50 años de registro

comprendido entre los años 1970 y 2020, en coincidencia al período de estudio de los caudales máximos del arroyo Nogoyá. Para este período se utilizaron los datos de alturas medias diarias del río Paraná, las que se ordenaron de menor a mayor, y se calculó el porcentaje de excedencia para cada registro, es decir el porcentaje de veces durante el cual una determinada altura fue igualada o superada. Al graficarla, se forma una curva en la cual la máxima altura registrada tiene una excedencia del 0% y la mínima del 100%.

Para este estudio se consideró como elevada una altura del río Paraná que podía ser igualada o superada solo un 5% del tiempo durante el período en estudio. Con estos criterios ya definidos se graficó la curva de frecuencia de alturas medias diarias del río Paraná, presentada en la Figura 6.1. Para obtener la altura media diaria correspondiente a una frecuencia de ocurrencia 5% de excedencia se entró a la curva y se obtuvo el valor de 5,09 metros.

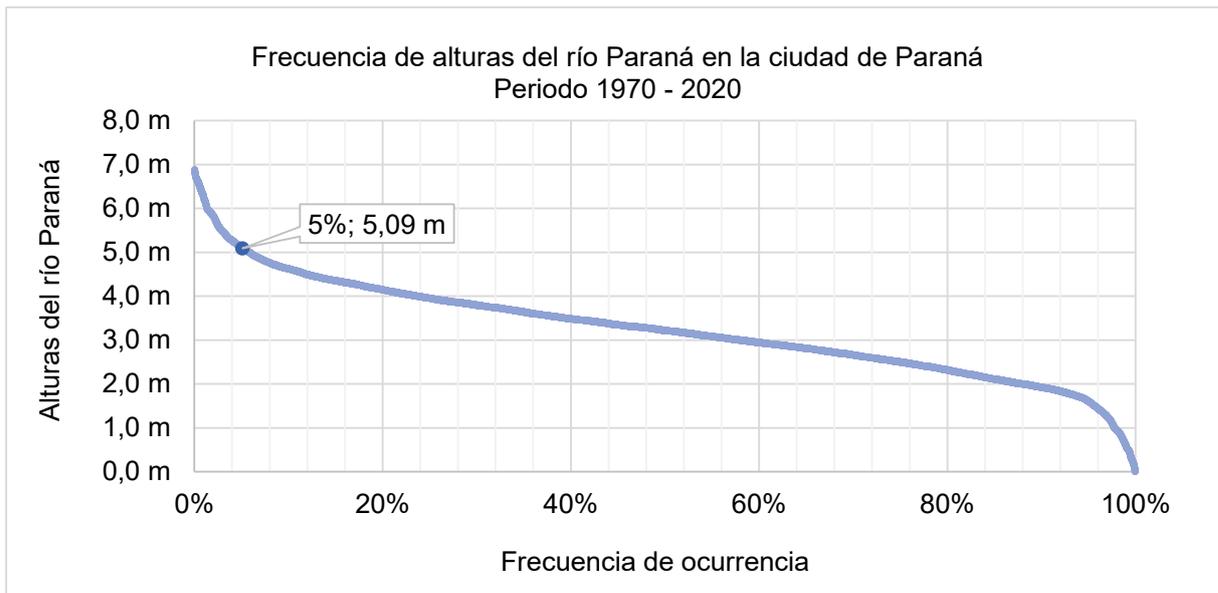


Figura 6.1. Curva de frecuencia de alturas medias diarias río Paraná. Estación 3050 – Túnel Subfluvial.

Seguidamente, se buscó aquel valor de altura del río Paraná que haya sido medido el día que se registró el caudal máximo anual que conforma los distintos valores de la serie de caudales máximos anuales del arroyo Nogoyá. De esta manera se aseguró que el valor de altura correspondiera al mismo día en que se registró el valor de caudal.

Con el valor de altura del río Paraná definido, se procedió a contrastar con la serie de caudales máximos del arroyo Nogoyá a fin de descartar aquellos valores de caudales que correspondían a días en que se excedía la altura de 5,09 metros en el río Paraná.

Para ello, se representaron estos valores mediante la gráfica de interrelación de la Figura 6.2, en base a la cual se descartaron los valores de caudal máximo de los años de registro de la cuenca del arroyo Nogoyá en los cuales la altura media del río Paraná superaba la correspondiente a un 5% de excedencia. Los valores descartados correspondieron a los años: 1991, 1996, 1997, 2006 y 2009.

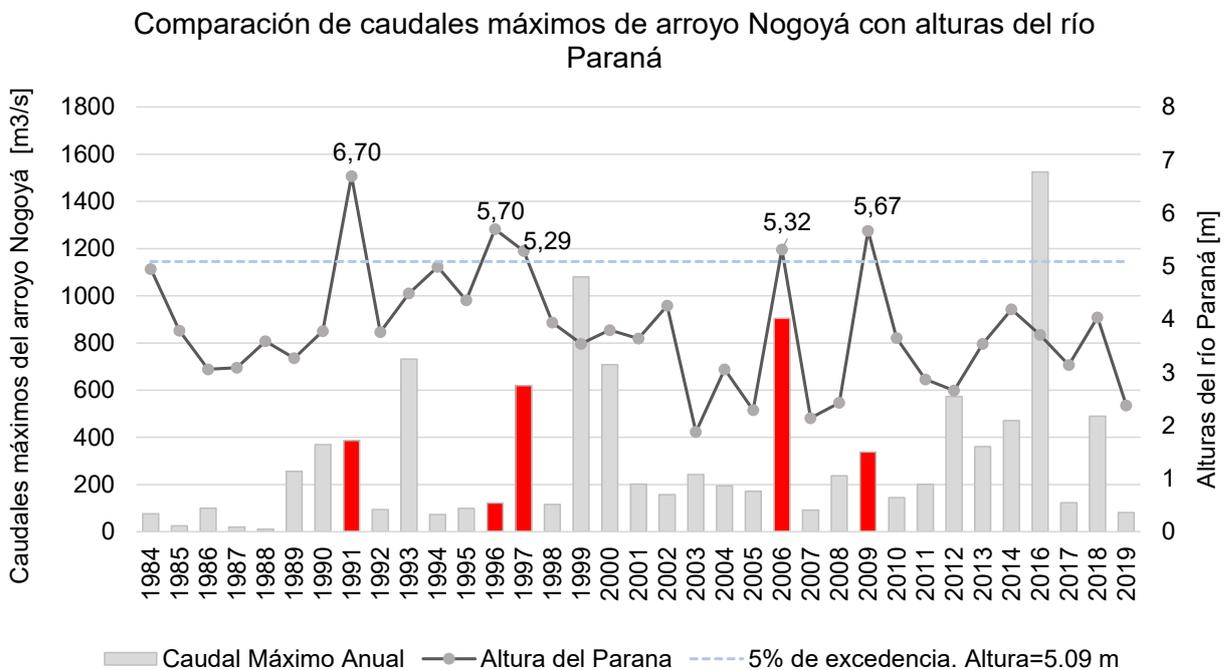


Figura 6.2. Comparación de caudales máximos del arroyo Nogoyá con alturas del río Paraná.

Las series de caudales máximos anuales se presentan en la Tabla 6.1, la cual resume los datos adoptados para cada una de las cuencas aforadas, descartando en estas series aquellos años con valores que no eran representativos de los caudales máximos o que no cumplían con los criterios adoptados.

Tabla 6.1. Serie de caudales máximos anuales.

Estación	3003	3004	3030	3037	3061	3808
Año Hidrológico	Feliciano	Gualeguay	Gualeguaychú	Nogoyá	Yuquerí Grande	Guayquiraró
1975	806,5					216,6
1976	436					194,4
1977	Sin datos					Sin datos
1978	875,1					198,2
1979	292,3					124,9
1980	340,9					Sin datos
1981	108,1					Sin datos
1982	326,5					507,3
1983	611					Sin datos
1984	481,7			75,7		182,6
1985	845,5			25,4		277,5
1986	376,7			100		130,2
1987	1.934,40		Sin datos	19,9		512,8
1988	446,7		316,1	10,6		134,4
1989	721,5		265,8	256,3		299,1
1990	331,6		205,2	369		201,4
1991	716,9		51,5	Sin datos	Sin datos	361,3
1992	557,1	539,7	391,2	93,4	Sin datos	Sin datos
1993	641	745,9	301,2	731,7	157,7	300,4
1994	223,5	226	86,5	72,5	49,6	262,9
1995	925,3	338	176,2	98,7	91,5	185,1
1996	131,2	69,1	6,8	Sin datos	107,9	79
1997	2.248,40	744,5	376,3	Sin datos	275,2	364,8
1998	520,6	539,7	427	115,9	160,3	116,9
1999	245,4	680,7	630,9	1.080,20	101,6	198,1
2000	665,2	592,9	319,2	708	69,3	293,7
2001	735,8	930,5	319,2	201,5	115,6	302,4
2002	2.254,10	2.106,70	585,2	157,4	107	314,7
2003	195,7	819,4	150,4	242,1	65	104,1
2004	2.373,90	2.049,70	536,1	194,2	160,8	208,4
2005	660,1	307,1	144	172	10,9	250,1
2006	671	2.590,70	316,8	Sin datos	96,6	190,3
2007	166,9	346,6	272,3	91,4	23,8	205
2008	367,9	303,6	154,4	236,8	129,5	Sin datos
2009	1.575,90	2.310,70	449,9	Sin datos	238,6	291,3
2010	Sin datos	329,3	63,3	144,5	11,7	35,7
2011	665,3	504,5	240	200,7	Sin datos	236

Estación	3003	3004	3030	3037	3061	3808
Año Hidrológico	Feliciano	Gualeguay	Gualeguaychú	Nogoyá	Yuquerí Grande	Guayquiraró
2012	851,8	2.707,00	240	572,6	254,2	Sin datos
2013	798	393,8	127,3	360,8	47,2	Sin datos
2014	745,5	843,4	287,4	471,1	Sin datos	Sin datos
2015	2.243,60	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos
2016	458,9	769,2	253,5	1.524,90	Sin datos	Sin datos
2017	1.529,90	1.610,60	377	122,8	Sin datos	Sin datos
2018	Sin datos	1.599,30	461,1	489,8	Sin datos	Sin datos
2019	Sin datos	562,6	182,4	81,4	Sin datos	Sin datos

Definida la serie de caudales máximos anuales, se procedió a realizar un análisis de ajustes de funciones de distribución de frecuencias con el software AfMulti, el cual permite estimar los valores de la variable de acuerdo a las distintas funciones de distribución de frecuencias para distintas recurrencias.

Para el uso de este software en particular se debió trabajar las series de caudales máximos anuales con números enteros sin decimales, ingresando los valores de cada estación multiplicados por 100. Esto se debe a que el software no reconoce los decimales.

En los casos que no se contaba con registros de caudal se descartaba el año completo y se continuaba cargando la serie con los datos de los años siguientes. Es por lo que, en la Figura 6.3, se observa a modo de ejemplo, que el año 1977 no se representa.

Estación: 3003 - Feliciano - Paso Medina

Estudio: Serie de caudales maximos anuales

AÑO HIDROLOGICO	CAUDALES MAX. ANUALES *100
1975	80650
1976	43600
1978	87510
1979	29230
1980	34090
1981	10810
1982	32650
1983	61100
1984	48166
1985	84550
1986	37670
1987	193437
1988	44670
1989	72150
1990	33160
1991	71690
1992	55710
1993	64100
1994	22350
.....

*Frecuencia empírica: $FN(X) = (i - B) / (N - (2*B) + 1)$

Figura 6.3. Interfaz AfMulti.

Una vez cargados los valores de caudales, se debieron ingresar las probabilidades de ocurrencia utilizadas en este estudio, sabiendo que:

$$Probabilidad\ de\ ocurrencia\ (Pr) = \frac{1}{Recurrencia\ (TR)}$$

En este caso se trabajó con probabilidades de 0,5 - 0,2 - 0,1 - 0,05 - 0,02 y 0,01, que corresponden a recurrencias de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Se utilizaron estas recurrencias debido a que son las adoptadas frecuentemente en el diseño y verificación de obras hidráulicas.

Como se mencionó anteriormente, el programa trabaja con 7 distribuciones de frecuencia con un método de ajuste particular para cada una. En virtud de llevar a cabo el estudio, se utilizaron las distribuciones de Log – Gauss, Gumbel, GEV, Pearson y Exponencial como se muestra en la Figura 6.4.

Una vez seleccionadas las funciones de distribución, se procedió al cálculo de la variable para las distintas recurrencias.

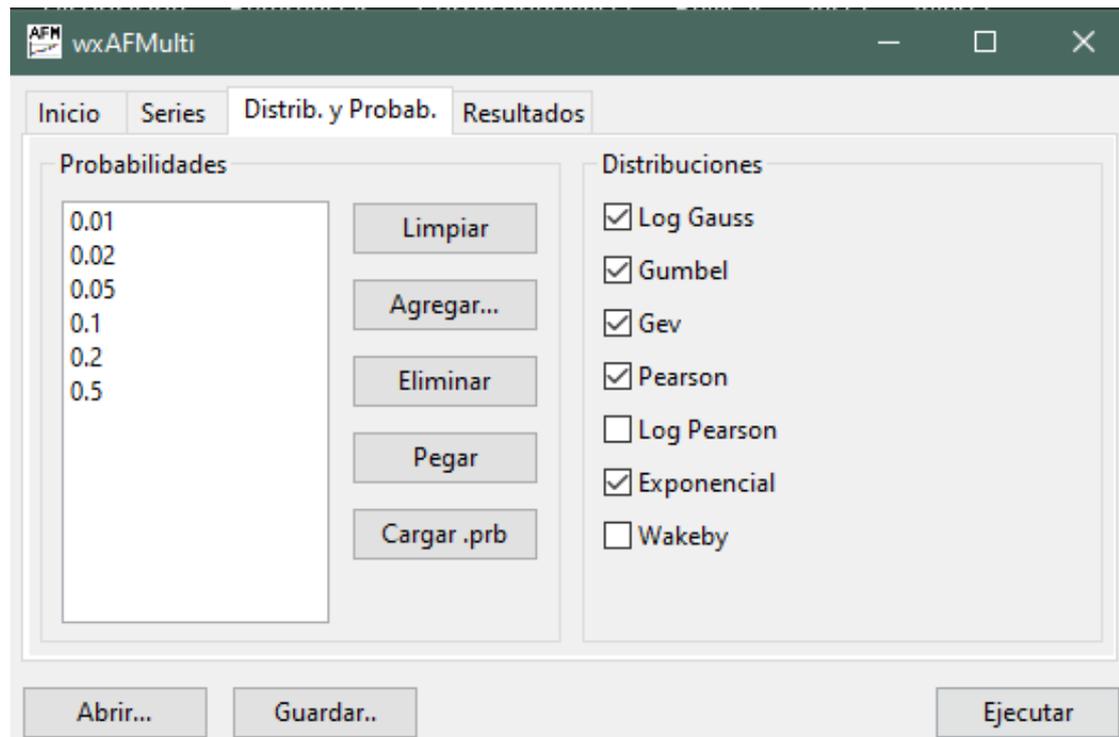


Figura 6.4. Selección de probabilidades y frecuencias de ajuste.

Para cada cuenca se obtuvieron los valores de caudal máximo para las probabilidades correspondientes a las recurrencias mencionadas y la bondad de ajuste. El software devuelve resultados numéricos y gráficos donde se observan las aproximaciones de las funciones para la variable estudiada y la bondad de ajuste según el cálculo de errores que realiza.

Partiendo de adoptar aquellos ajustes estadísticos de menor error, se unificó el criterio optando por la función de GEV ya que ajustaba con errores pequeños para todas las cuencas. Para la cuenca del Feliciano, se adoptó particularmente la función de Pearson porque fue la seleccionada en el proyecto realizado anteriormente que estudió dicha cuenca.

En la Figura 6.5 se presenta a modo de ejemplo, un gráfico de distribución de ajuste visual, para las distribuciones de Gumbel, GEV y Pearson.

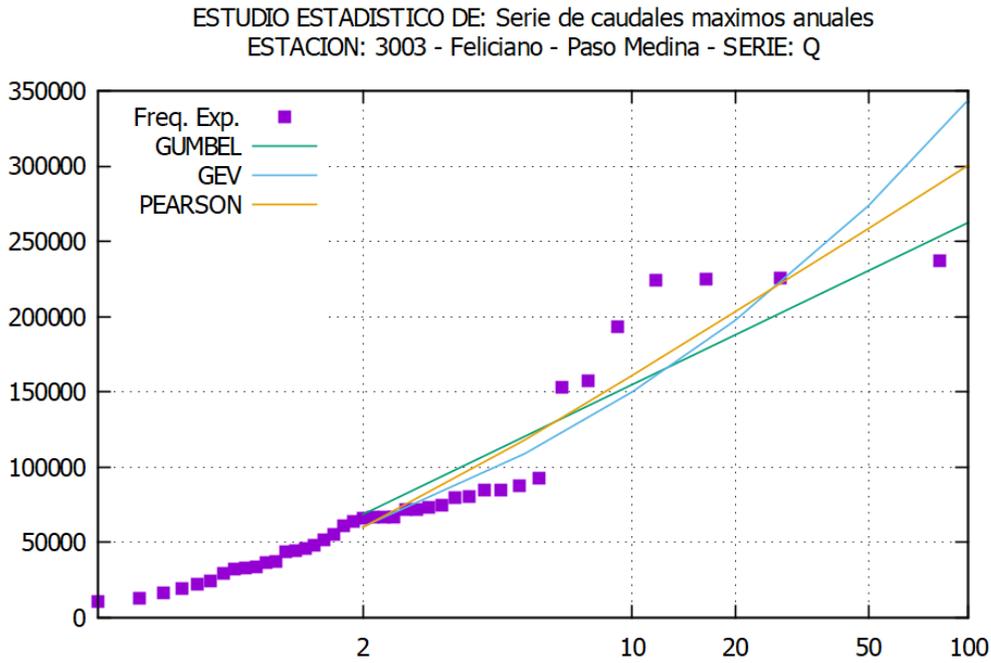


Figura 6.5. Frecuencia experimental y Frecuencias de ajuste.

Para representar el error cuadrático medio y variable de cada función, el software devuelve un gráfico de barras como el que se presenta en la Figura 6.6 para la cuenca del arroyo Nogoyá. Se observa que particularmente en este caso la función que tiene menor error es la de GEV.

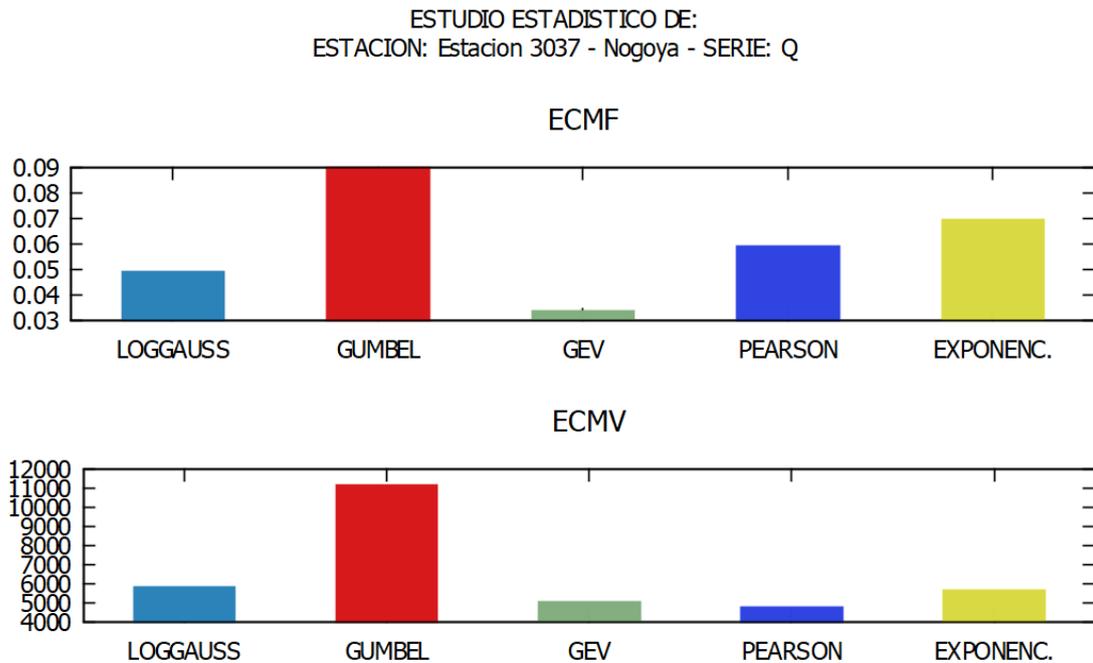


Figura 6.6. Gráfica errores cuadráticos medios de frecuencia ECMF y variable ECMV.

Luego, el software devuelve los valores buscados según las probabilidades y funciones adoptadas para el análisis, para este estudio, la variable buscada era el caudal máximo para las probabilidades ya mencionadas.

En la Tabla 6.2 se presentan los valores obtenidos con el AfMulti de caudales máximos de la cuenca del Nogoyá para las distintas probabilidades de ocurrencia y funciones de distribución. En gris se resaltaron los valores para la función GEV, los cuales fueron utilizados finalmente en este estudio para dicha cuenca.

Tabla 6.2. Caudales para distintas probabilidades. Arroyo Nogoyá – Estación 3037 – RP N° 11.

PROBABILIDAD	CAUDAL				
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.
0,01	1.640,2	1.242,0	1.936,3	1.558,1	1.522,4
0,02	1.281,4	1.078,6	1.407,0	1.308,2	1.287,5
0,05	884,9	860,6	900,5	980,5	977,0
0,10	636,9	692,2	622,6	735,5	742,1
0,20	427,6	516,6	408,5	494,5	507,2
0,50	199,6	251,4	187,9	188,5	196,7

En la Tabla 6.3 se presenta un resumen con los valores de caudales máximos para cada cuenca según la función adoptada.

Tabla 6.3. Resumen caudales máximos software AfMulti.

Cuenca	A km ²	TR Años	Q m ³ / s	Función adoptada
Guayquiraró	3.074	2	220	GEV
		5	319	
		10	381	
		20	438	
		50	509	
		100	559	
Yuquerí Grande	677	2	100	GEV
		5	170	
		10	217	
		20	263	
		50	324	
		100	370	
Guauguay	16.038	2	716	GEV
		5	1.342	
		10	1.871	
		20	2.486	
		50	3.472	
		100	4.384	
Guauguaychú	2.029	2	265	GEV
		5	408	
		10	493	
		20	568	
		50	656	
		100	717	
Feliciano	5.573	2	601	Pearson
		5	1.182	
		10	1.610	
		20	2.033	
		50	2.585	
		100	3.005	
Nogoyá	3.873	2	188	GEV
		5	408	
		10	623	
		20	901	
		50	1.407	
		100	1.936	

Los valores de caudales máximos de las subcuencas del arroyo Feliciano y río Gualeguaychú se obtuvieron de la modelación de cada una en el software HEC-HMS, para lo cual se ingresaron los valores de precipitación correspondientes a cada recurrencia. Estos valores de caudales máximos se tomaron de los proyectos mencionados.

6.3. Precipitación media areal

Es la precipitación sobre toda la superficie de la cuenca, que está promediada en el tiempo, por ejemplo, una serie de años, o una serie de valores del mismo mes.

El cálculo de la Precipitación Media Areal se realizó usando las curvas Intensidad Duración Recurrencia (IDF) realizadas en los Proyectos "Estudio de tormentas de diseño en las cuencas del arroyo Feliciano y río Gualeguaychú de la provincia de Entre Ríos" (Bonomi et al., 2016) y "Estudio de tormentas de diseño en cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos" (Lopez et al., 2020).

En primera instancia, se calculó el tiempo de concentración de la zona en estudio para de esta manera obtener la duración de la tormenta, la cual se obtuvo aplicando una duración de tormenta de dos a tres veces el tiempo de concentración, según la siguiente relación:

$$d = 2 \text{ a } 3 \text{ veces } T_c$$

Siendo T_c el tiempo de concentración calculado según la fórmula de Illinois mencionada en el marco teórico.

Luego de realizado este cálculo, se siguió la premisa de adoptar valores enteros en la unidad de tiempo (días), ya que las curvas IDF mencionadas contemplan duraciones de tormenta de 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 días.

Debido a que para la construcción de las curvas IDF mencionadas, se adoptaron distintos puntos de cierre de las distintas cuencas, se debió seleccionar previamente la curva utilizada en cada caso. Esta selección se realizaba en función del área de la cuenca en estudio, por lo que se eligió la curva cuya área era la más cercana, inmediata superior o inferior, al valor promedio de área de las cuencas en estudio.

Una vez calculado el valor de la intensidad de la tormenta para el período de retorno deseado, se obtuvo la Precipitación Media Areal multiplicando la intensidad por la duración de la tormenta adoptada mediante la siguiente ecuación:

$$PMA = I \left[\frac{mm}{hs} \right] \times d [h]$$

Siendo I la intensidad de la tormenta y d la duración de tormenta adoptada.

La Precipitación Media Areal se afectó por un coeficiente de ajuste debido a que difiere del máximo local. *“La evaluación habitual de la PMA consiste en la predicción local de la lámina precipitada de una estación núcleo, asumida como foco del evento y su atenuación con un ábaco en función del área de aporte y de la duración de lluvia.”.* (Bonomi et al., 2016)

En los proyectos mencionados, se calcularon ecuaciones a fin de obtener los valores de Coeficiente de Abatimiento Areal (CAA) correspondientes a las características de las cuencas, teniendo en cuenta la duración de la tormenta.

El cálculo del Coeficiente de Abatimiento Areal Estación de Referencia (CAA ER) se realizó en función del área de la cuenca de la estación de referencia.

En cambio, el Coeficiente de Abatimiento Areal Estación de la cuenca estudiada (CAA 01), se calculó en función del área de la cuenca cuya PMA se quería calcular.

Finalmente, habiendo determinado tanto la Precipitación Media Areal, como ambos Coeficientes de Abatimiento Areal, se calculó la Precipitación Media Areal de la cuenca en estudio mediante la siguiente expresión:

$$PMA(01) = PMA (ER) \times \frac{CAA (01)}{CAA (ER)}$$

A modo de ejemplo, se presenta la Tabla 6.4, en donde se muestra para una recurrencia de 2 años los coeficientes de intensidad de precipitación en función de las distintas duraciones de tormenta, utilizados para calcular la Precipitación Media Areal en el caso de unas de las subcuencas del arroyo

Feliciano a partir de los datos de la IDF de la cuenca aforada del arroyo Feliciano en Paso Medina.

Tabla 6.4. Cálculo de PMA.

DATOS EXTRAÍDOS DE PID 3882				ESTACIÓN DE REFERENCIA				CUENCA		
				RUTA PROVINCIAL N°6			A:5538Km ²	Arroyo Feliciano	A:5573Km ²	
R años	Duración días	COEFICIENTES EC.: CAA=Mxln(A)+N		COEFICIENTES IDF			PMA(ER)	CAA(ER)	PMA(O1)	CAA(O1)
		M	N	A	B	C	mm		mm	
2	1	-0,04	1,15	592,60	1,55	0,69	94,05	0,84	94,02	0,84
2	2	-0,01	1,06	592,60	1,55	0,69	116,64	0,94	116,63	0,94
2	4	-0,01	1,04	592,60	1,55	0,69	144,63	0,96	144,62	0,96
2	6	-0,09	1,04	592,60	1,55	0,69	164,01	0,26	163,65	0,26
2	8	-0,08	1,03	592,60	1,55	0,69	179,32	0,34	179,06	0,34
2	10	-0,09	1,04	592,60	1,55	0,69	192,16	0,26	191,74	0,26
2	12	-0,07	1,03	592,60	1,55	0,69	203,34	0,42	203,13	0,42

Se verificó el cálculo del PMA realizando la relación entre CAA(O1) y CAA(ER), siendo el resultado menor a la unidad cuando el área de la estación de referencia era menor que el área de la estación estudiada. Por el contrario, la relación entre los coeficientes daba un valor mayor a la unidad cuando el área de la estación de referencia era mayor que el área de la estación estudiada.

Las curvas IDF de la Figura 6.7 se utilizaron para obtener la intensidad de tormenta de la subcuenca del arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina para distintas recurrencias, y fueron calculadas en el proyecto "Estudio de tormentas de diseño en cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos" (Lopez et al., 2020).

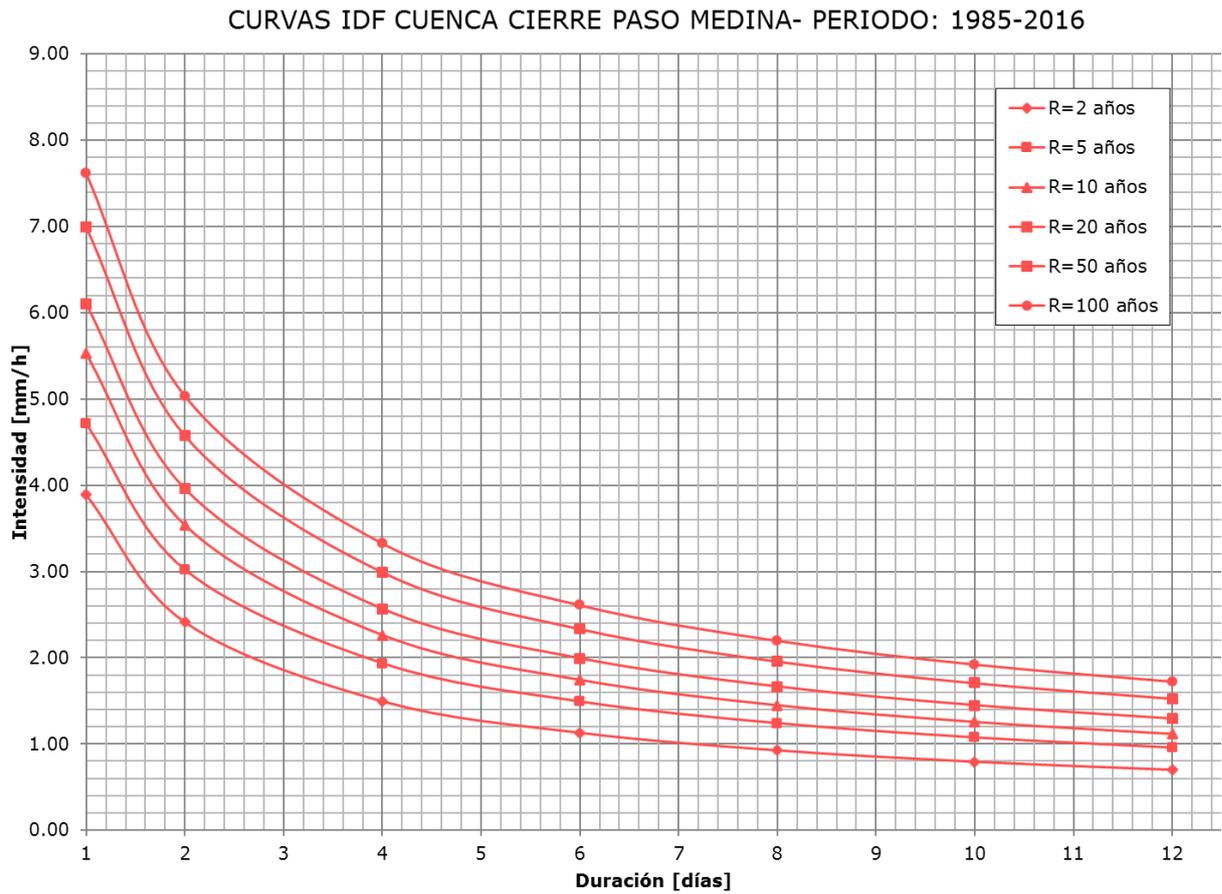


Figura 6.7. Curvas IDF subcuenca arroyo Feliciano Cierre Paso Medina.

El Coeficiente de Abatimiento Areal para el ejemplo de la subcuenca del arroyo Feliciano se calculó según la expresión "CDA(2d)" extraída de las Curvas de decaimiento areal del proyecto "Estudio de tormentas de diseño en las cuencas del arroyo Feliciano y río Gualeguaychú de la provincia de Entre Ríos" (Bonomi et al., 2016), presentada en la Figura 6.8.

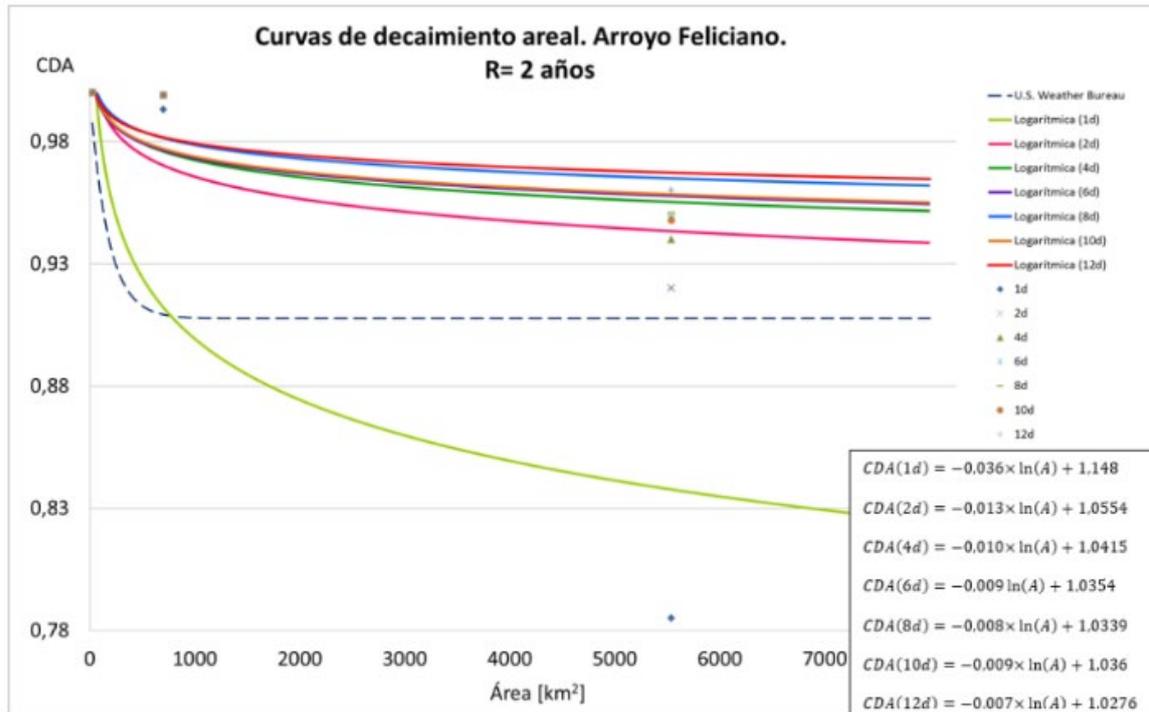


Figura 6.8. Curvas de decaimiento o abatimiento areal. Arroyo Feliciano.

6.4. Características físicas

Las características físicas de las cuencas conformaron, junto con las precipitaciones, las variables independientes de este estudio y por lo tanto se mantuvieron constante para todos los análisis que se realizaron.

Las variables correspondientes a las características utilizadas en este estudio se presentan en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 - Características físicas generales

Variable	Descripción	Unidad
A	Área de la cuenca	km ²
R	Coficiente de almacenamiento	h
Kc	Coficiente de compacidad	-
Lambda	Coficiente Lambda	-
Lc	Longitud del curso principal	km ²
i	Pendiente media del curso principal	m/m
P	Perímetro	km
Tc	Tiempo de Concentración	h

Para calcular los límites físicos de las cuencas aforadas en estudio se utilizó el software QGIS. En este proceso se utilizaron Datos Digitales de Elevación del terreno (MDE) brindados por el Instituto Geográfico Nacional

(IGN), para poder representar la topografía de Entre Ríos y mediante QGIS se realizó la delimitación de las distintas cuencas.

Se modeló cada cuenca aforada en el software obteniendo sus delimitaciones, topografía y red de drenaje. Luego, se procedió a obtener con la herramienta "Calculadora de campos", el área y perímetro de cada una.

La longitud del curso principal correspondiente a cada cuenca aforada se obtuvo también con el QGIS. Se identificó cada tramo componente de la red de drenaje asignándoles el tipo de cauce Principal o Secundario según correspondiera. Finalmente, se sumaron las longitudes de los cauces que pertenecían al curso Principal y se obtuvo la longitud del curso principal.

La pendiente media del curso principal se calculó con el cociente entre el desnivel y la longitud del curso principal utilizando el QGIS. Para ello, cargados los MDE de cada cuenca se utilizaron herramientas del software que permiten obtener las cotas en el punto de inicio y salida del curso. Luego se calculó la diferencia de cotas para obtener el desnivel y finalmente se realizó el cociente entre este valor y la longitud del curso obteniendo la pendiente media del curso principal.

Las demás características de las cuencas aforadas se calcularon con las fórmulas expresadas anteriormente en el Marco Teórico: Coeficiente de Compacidad (K_c), Coeficiente Lambda, Coeficiente de Almacenamiento (R) y Tiempo de Concentración (T_c).

Los parámetros físicos obtenidos para cada cuenca se resumen en la Tabla 6.6:

Tabla 6.6. Parámetros físicos de las cuencas aforadas.

Cuenca	A km ²	P km	K_c -	L_c km	i m/m	T_c h	R h	Lambda -
Guayquiraró	3.074	557,6	2,8	129,5	0,00036	63,6	43,9	0,4
Yuquerí Grande	677	214,4	2,3	50,7	0,00117	22,6	12,6	0,4
Guauguay	16.038	1.350,4	3,0	495,7	0,00009	266,2	213,2	0,4
Guauguaychú	2.029	420,0	2,6	113,5	0,00042	55,2	37,3	0,4
Feliciano	5.573	732,0	2,7	151,5	0,00024	78,4	63,4	0,4
Nogoyá	3.873	523,5	2,4	137,0	0,00052	62,6	33,6	0,3

La información hidrológica y física de las subcuencas pertenecientes a las cuencas del Feliciano y Guauguaychú se extrajeron de los Proyectos Finales

mencionados. En las Tablas 6.7 y 6.8 se presentan en resumen los valores de los parámetros físicos para cada subcuenca.

Tabla 6.7. Parámetros físicos de las subcuencas (Cuenca del arroyo Feliciano).

Cuenca	A km ²	P km	Kc	Lc km	i m/m	Tc h	R h	Lamda
F_C18_2_Arroyo Tases	80	47,2	1,5	23,2	0,00058	13	17	1
F_C12_1_Arroyo Estacas Este	216	67,8	1,3	31,7	0,00069	16	16	1
F_C15-1_Arroyo Tuna	228	71,5	1,3	28,7	0,00058	16	18	1
F_2_Junction_9	616	122,3	1,4	49	0,00065	22	20	0,9
F_3_Junction_2	1.095	155,6	1,3	56,9	0,0004	30	31	1
F_3_Junction_7	740	125,4	1,3	63,3	0,00044	32	29	0,9
F_4_Junction_16	753	164,8	1,7	77,6	0,00048	36	30	0,8
F_4_Junction_4	1.444	178,6	1,3	76	0,00038	39	35	0,9
F_5_Junction_7	2.437	244,6	1,4	102,3	0,00026	51	44	0,9
F_7_Junction_10	3.521	317,8	1,5	150,5	0,00022	74	69	0,9
F_10_Junction_13	4.620	375,3	1,6	190,6	0,00022	90	65	0,7
F_13_Junction_17	6.848	464,8	1,6	228,9	0,00024	108	75	0,7
F_15_Junction_22	8.210	523,6	1,6	268,5	0,00024	122	79	0,6
F_14_Junction_21	7.145	479,2	1,6	251,3	0,00024	118	79	0,7
F_12_Paso_Medina	5.555	401,9	1,5	210,4	0,00021	100	70	0,7

Tabla 6.8. Parámetros físicos de las subcuencas (Cuenca del río Gualeguaychú).

Cuenca	A km ²	P km	Kc	Lc km	i m/m	Tc h	R h	Lamda
G_CP01W92	168	104,4	2,3	26	0,00092	13	22	0,6
G_CP02W141	169	90,4	2	22,7	0,00101	12	19	0,6
G_CP03W150	265	128,2	2,2	28	0,00096	14	21	0,6
G_CP09W530	322	132,7	2,1	39,3	0,00104	19	23	0,5
G_CP14W860	370	121,3	1,8	31,2	0,0016	14	15	0,5
G_CP12W680	396	140,8	2	43,5	0,00101	20	13	0,4
G_CP14W950	703	169,3	1,8	44,6	0,00125	20	11	0,4
G_CP16W1050	271	112,9	1,9	33,9	0,00154	15	9	0,4
G_CP08W450	907	239,4	2,2	64,7	0,00063	31	22	0,4
G_CP10W580	1.302	313,9	2,5	79,1	0,00059	38	25	0,4
G_CP06W331	1.686	321,3	2,2	86,6	0,00049	42	31	0,4
G_CP07W440	2.280	443,9	2,6	124,3	0,00043	59	38	0,4
G_CP10W600	3.673	522,1	2,4	135,4	0,00044	64	39	0,4
G_CP11W740	4.762	607,6	2,5	154,5	0,00039	73	44	0,4
G_CP13W870	5.094	657,7	2,6	176,3	0,00039	82	47	0,4
G_CP15W1000	6.971	740,4	2,5	195,9	0,00037	91	50	0,4
G_CP15W1040	6.385	709,8	2,5	184,1	0,00038	86	48	0,4
G_CP15W1030	6.661	726,9	2,5	191,1	0,00037	89	49	0,4

6.5. Análisis multivariado de las variables

Reunida la información de cada cuenca y subcuenca utilizada en este estudio se procedió a realizar inicialmente un análisis multivariado de las variables para la recurrencia de 2 años. Al comparar los valores de caudal calculados con las ecuaciones obtenidas mediante regresión lineal con los valores de caudales de entradas existían errores que superaban ampliamente el máximo de 20% propuesto para considerar válido el estudio.

Se eliminaron las subcuencas que tenían errores grandes y se volvieron a obtener las ecuaciones para estimar caudales obteniendo menores errores. Pero al intentar obtener el índice de creciente para calcular los caudales máximos para las demás recurrencias, se obtuvieron errores muy superiores al límite mencionado.

Los métodos aplicados son probabilísticos y requieren la mayor cantidad de información posible para obtener resultados verídicos, debido que para la recurrencia de 2 años se debieron descartar muchas subcuencas que no verificaban se redujo la información de entrada.

Por lo tanto, se procedió a comenzar de nuevo con el análisis multivariado utilizando los valores de variables para la recurrencia de 5 años. Para esta recurrencia se obtuvieron menores diferencias entre los valores de caudales de partida con los estimados con las ecuaciones obtenidas con la regresión lineal.

Para las demás recurrencias se obtuvieron las ecuaciones para estimar caudales máximos con el método de regresión lineal utilizando los análisis multivariados obtenidos para la recurrencia de 5 años. A continuación, se describe el procedimiento realizado para obtener las ecuaciones de estimación de caudal máximo para la recurrencia de 5 años.

En primera instancia se evaluó la interdependencia entre todas las variables, aunque el objetivo principal era conocer cuales se correlacionaban mejor con el caudal máximo, es decir cuales influían mayormente en la variabilidad de éste.

Para realizar este análisis se trabajó con el software Rstudio, aplicando distintos métodos de análisis estadístico. Se debieron estandarizar los valores de

las variables ya que entre ellas tenían grandes diferencias en ordenes de magnitud, por ejemplo, el área o longitud del cauce con cifras de varios miles y variables como la pendiente cuya primera cifra distinta a cero era la quinta o sexta decimal. Para ello, con el Rstudio se obtuvieron los valores de las variables estandarizadas que se utilizaron en el análisis multivariado aplicando la siguiente fórmula:

$$x_{std} = \frac{x_i - x_m}{\sigma}$$

donde:

x_{std} : es el valor de la variable estandarizado,

x_i : es el valor de la variable,

x_m : es la media de la muestra,

σ : es la desviación estándar de la muestra.

Se ingresaron al software los valores estandarizados de las variables del estudio, descriptas en los puntos anteriores, para las cuencas aforadas y las subcuencas y se continuó con el análisis multivariado de éstas.

El primer método utilizado fue el de la matriz de correlación (Figura 6.9) el cual devuelve una matriz con valores entre 0 y 1, indicando un valor 0 que no hay ninguna correlación y el valor de 1 una excelente correlación.

Se tomó como referencia que los valores superiores al valor absoluto 0,70 indicaban las mejores correlaciones. En función de ello, de la matriz obtenida con el método, las variables que mejor correlacionaron con el caudal máximo fueron: el área (A), la longitud del cauce (Lc), la pendiente (i), el tiempo de concentración (Tc), el coeficiente de almacenamiento (R) y la Precipitación Media Areal (PMA).

A su vez, se observó que existía una buena interrelación entre las variables ya que un valor mayor a 0,5 significa un efecto grande entre variables (Cohen, 1988).

	Q ^{5años}	A	P	Kc	Lc	i	Tc	R	Lamda	PMA
Q ^{5años}	1,00	0,84	0,66	0,01	0,85	-0,71	0,81	0,74	-0,12	0,88
A		1,00	0,92	0,35	0,99	-0,65	0,98	0,92	-0,31	0,82
P			1,00	0,65	0,89	-0,60	0,89	0,81	-0,52	0,65
Kc				1,00	0,33	0,00	0,34	0,26	-0,80	-0,01
Lc					1,00	-0,65	1,00	0,95	-0,29	0,85
i						1,00	-0,64	0,58	-0,12	-0,76
Tc							1,00	0,97	-0,27	0,84
R								1,00	-0,13	0,83
Lamda									1,00	0,09
PMA										1,00

Figura 6.9. Diagrama de correlación de variables.

El análisis estadístico, se complementó con la aplicación del Método de Componentes Principales para obtener gráficamente la dependencia entre las variables y poder comparar con los resultados obtenidos anteriormente.

Este método grafica las variables en un par de ejes "X" e "Y" en forma de vectores (Figura 6.10) según una magnitud y una dirección, de esta manera se puede observar la interrelación entre las variables según coincidan o no en magnitud y dirección los vectores de cada variable independiente respecto del vector de la variable dependiente.

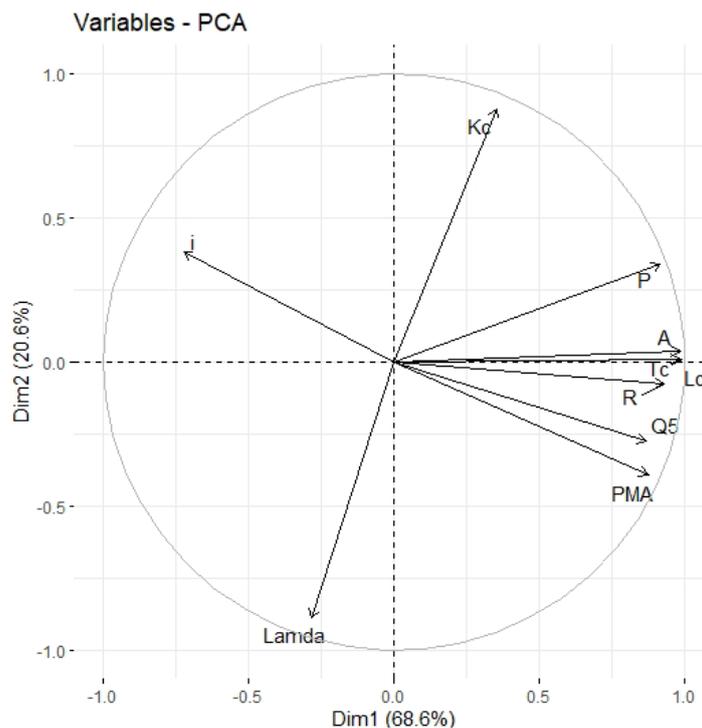


Figura 6.10. Gráfica Método de Componentes Principales.

En la Figura 6.10 puede observarse que las variables que se relacionan entre sí se grafican como vectores que tienen prácticamente la misma dirección y magnitud o longitud.

Las variables que según este método correlacionan mejor con el caudal máximo son: la PMA, el área (A), el perímetro (P), la longitud del cauce (Lc), el tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de almacenamiento (R). Estos resultados se asemejan al obtenido con el método de correlación.

El tercer método de análisis utilizado para observar la relación de las variables fue el de determinación de Clúster, a través del cual se agrupan y luego se grafica en un Dendograma (Figura 6.11) en función de la interdependencia que existe entre ellas.

En la Figura 6.11 se puede observar que el caudal máximo (Q5) se relaciona en mayor medida con la PMA, en un nivel inferior con el perímetro (P), el coeficiente de almacenamiento (R), el área (A), la longitud del cauce (Lc) y el tiempo de concentración (Tc). En menor medida se correlaciona con el coeficiente Lambda, la pendiente y el coeficiente de compacidad. El resultado es similar al que se obtuvo en los dos análisis anteriores.

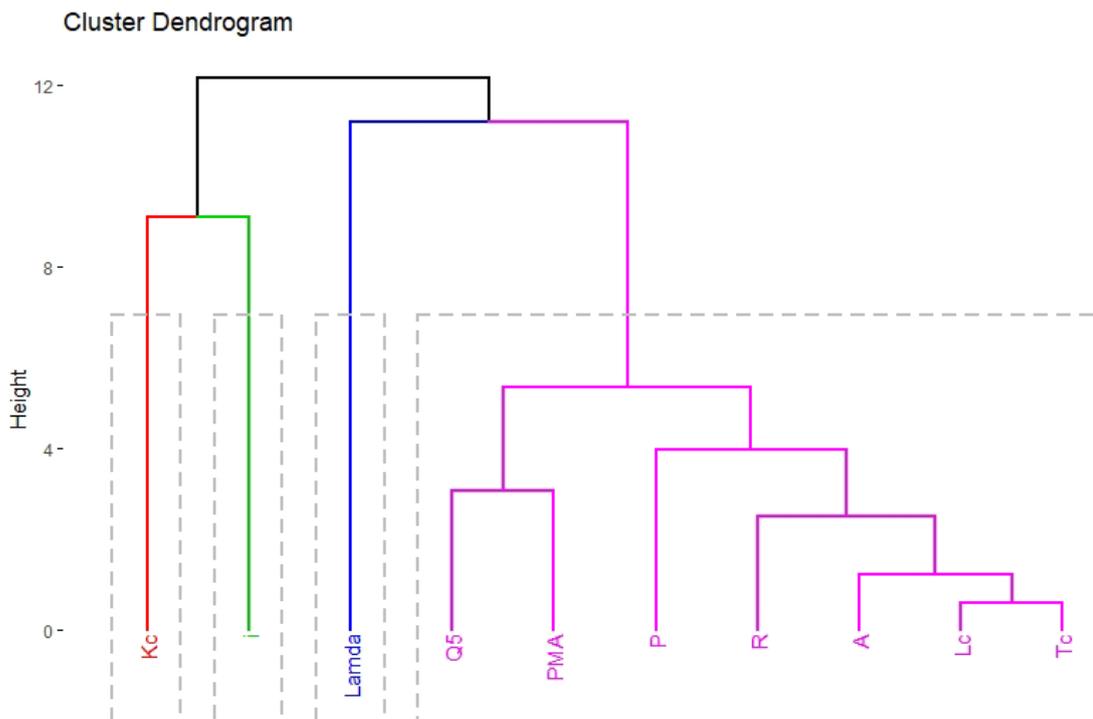


Figura 6.11. Dendograma de variables.

A partir de los resultados obtenidos de los tres análisis realizados, se seleccionaron las variables que mejor correlacionaron con el caudal máximo teniendo en cuenta principalmente los coeficientes de correlación de la matriz homónima del caudal máximo con las demás variables.

Bajo el concepto de adoptar para las fórmulas de correlación aquellas variables que se obtengan de forma directa, se seleccionaron tres variables que mostraban una buena correlación con el caudal máximo y fueran de fácil determinación, además, coincidentes con las seleccionadas en los proyectos anteriores.

Las variables seleccionadas ordenadas en función de su mayor correlación con el caudal máximo son las siguientes:

- Precipitación Media Areal
- Área
- Pendiente media del curso principal

Con estas tres variables y los valores de caudal máximo para 5 años de recurrencia se procedió a realizar el agrupamiento de las cuencas y subcuencas en función de sus características que definen regiones hidrológicamente homogéneas.

En la Tabla 6.9 se resumen los datos de las variables seleccionadas para definir las cuencas hidrológicamente homogéneas.

Tabla 6.9. Datos de las cuencas y subcuencas para la regionalización.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
Gualeguay	1.342	16.038	0,00009	318
F_13_Junction_17	1.573	6.848	0,00024	273
F_15_Junction_22	1.990	8.210	0,00024	271
F_14_Junction_21	1.653	7.145	0,00024	273
F_12_Paso_Medina	1.332	5.555	0,00021	275
G_CP12W680	121	396	0,00101	138
G_CP03W150	79	265	0,00096	133
G_CP02W141	50	170	0,00101	133
G_CP09W530	89	322	0,00104	144
G_CP14W860	153	370	0,0016	133
G_CP14W950	243	703	0,00125	138
G_CP16W1050	90	271	0,00154	126
Yuquerí Grande	170	677	0,00117	166
G_CP01W92	40	168	0,00092	133
Gualeguaychú	408	2.029	0,00042	183
G_CP07W440	386	2.281	0,00043	183
G_CP10W580	307	1.302	0,00059	166
G_CP06W331	338	1.687	0,00049	166
G_CP08W450	222	907	0,00063	153
F_2_Junction_9	346	616	0,00065	177
F_C12_1_Arroyo Estacas Este	163	216	0,00069	171
F_C18_2_Arroyo Tases	67	80	0,00058	171
F_C15-1_Arroyo Tuna	173	228	0,00058	184
G_CP11W740	743	4.763	0,00039	193
G_CP13W870	761	5.096	0,00039	198
Nogoyá	408	3.873	0,00052	194
G_CP10W600	618	3.674	0,00044	180
Guayquiraró	319	3.074	0,00036	224
F_4_Junction_4	511	1.444	0,00038	213
F_4_Junction_16	329	753	0,00048	213
F_3_Junction_2	421	1.095	0,0004	196
F_3_Junction_7	288	740	0,00044	196
G_CP15W1000	1.048	6.974	0,00037	206
G_CP15W1040	993	6.388	0,00038	206
G_CP15W1030	1.011	6.664	0,00037	206
F_5_Junction_7	945	2.437	0,00026	238
F_7_Junction_10	1.060	3.521	0,00022	242
Feliciano	1.182	5.573	0,00024	244
F_10_Junction_13	1.216	4.620	0,00022	259

6.6. Agrupamiento de cuencas hidrológicamente homogéneas

Las cuencas y subcuencas se agruparon en regiones homogéneas mediante un análisis de Clúster de las variables y se contrastaron los resultados obtenidos, con los gráficos de las Curvas de Andrews.

Con el análisis de Clúster se obtuvo el gráfico presentado en la Figura 6.12, en el cual a través de la representación en un Dendograma se observó la formación de cinco grupos de cuencas y subcuencas que presentaban características hidrológicamente homogéneas.

Posteriormente, a modo de verificación de los resultados obtenidos con el análisis de Clúster se calcularon y graficaron las Curvas de Andrews en función de la agrupación ilustrada en los Dendogramas (Figura 6.12). En estas curvas se observó que efectivamente existía un patrón entre las cuencas pertenecientes a cada grupo en cuanto a amplitud, período y forma en general.

A cada grupo se le aplicó el método de regresión lineal para obtener las ecuaciones de estimación de caudal máximo. Este método requiere que la cantidad de individuos sean igual a la cantidad de variables más 1.

En este estudio, las variables eran cuatro: el caudal máximo, la PMA, el área y la pendiente, y los individuos se conformaban con las cuencas y subcuencas, por lo tanto, fue necesario que cada grupo esté integrado por al menos 5 cuencas y subcuencas. Es por ello, que se procedió a reagrupar algunos grupos en función del área de las cuencas y subcuencas para poder aplicar el método.

La cuenca del Gualeguay tenía el área más grande, por ello se agrupó con el grupo de subcuencas de áreas mayores conformado por F_15_Junction_22, F_13_Junction_17, F_14_Juncion_21. Además, se sumó a este grupo la subcuenca del Feliciano con cierre en Paso Medina, denominada F_12_Paso_Medina ya que era la de mayor área y era necesaria incorporarla al grupo para aplicar el método de regresión lineal.

El grupo más grande que contenía a las cuencas aforadas del río Gualeguaychú, el arroyo Nogoyá y el río Guayquiraró junto a subcuencas del arroyo Feliciano y el río Gualeguaychú se dividió en dos grupos debido a que

en el gráfico de Curvas de Andrews se observaba disparidad entre las curvas, como se puede ver en la Figura 6.12.

La separación en los dos grupos se realizó en función del área y la pendiente de las cuencas y subcuencas.

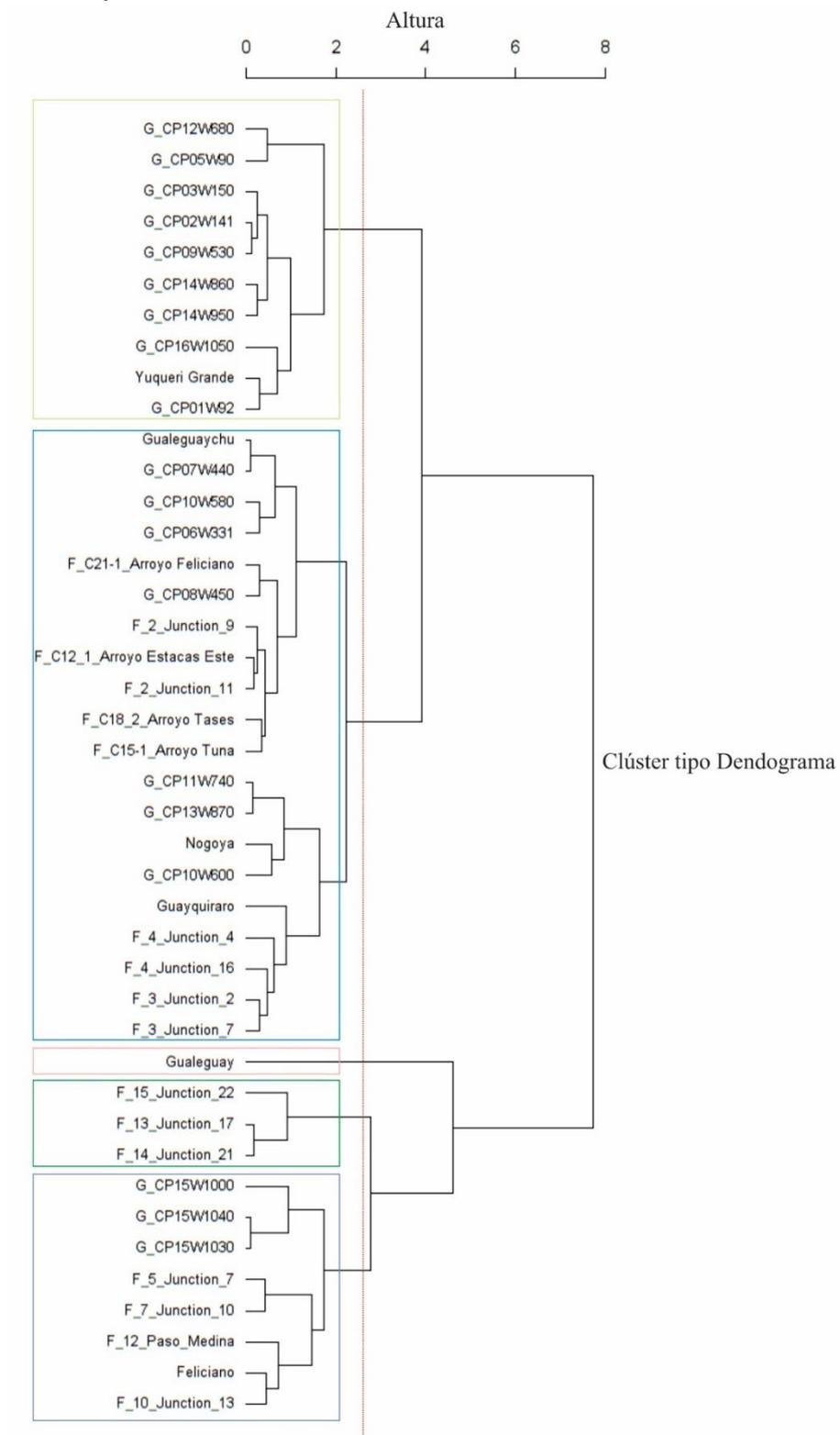


Figura 6.13. Dendrograma de grupos de cuencas y subcuencas.

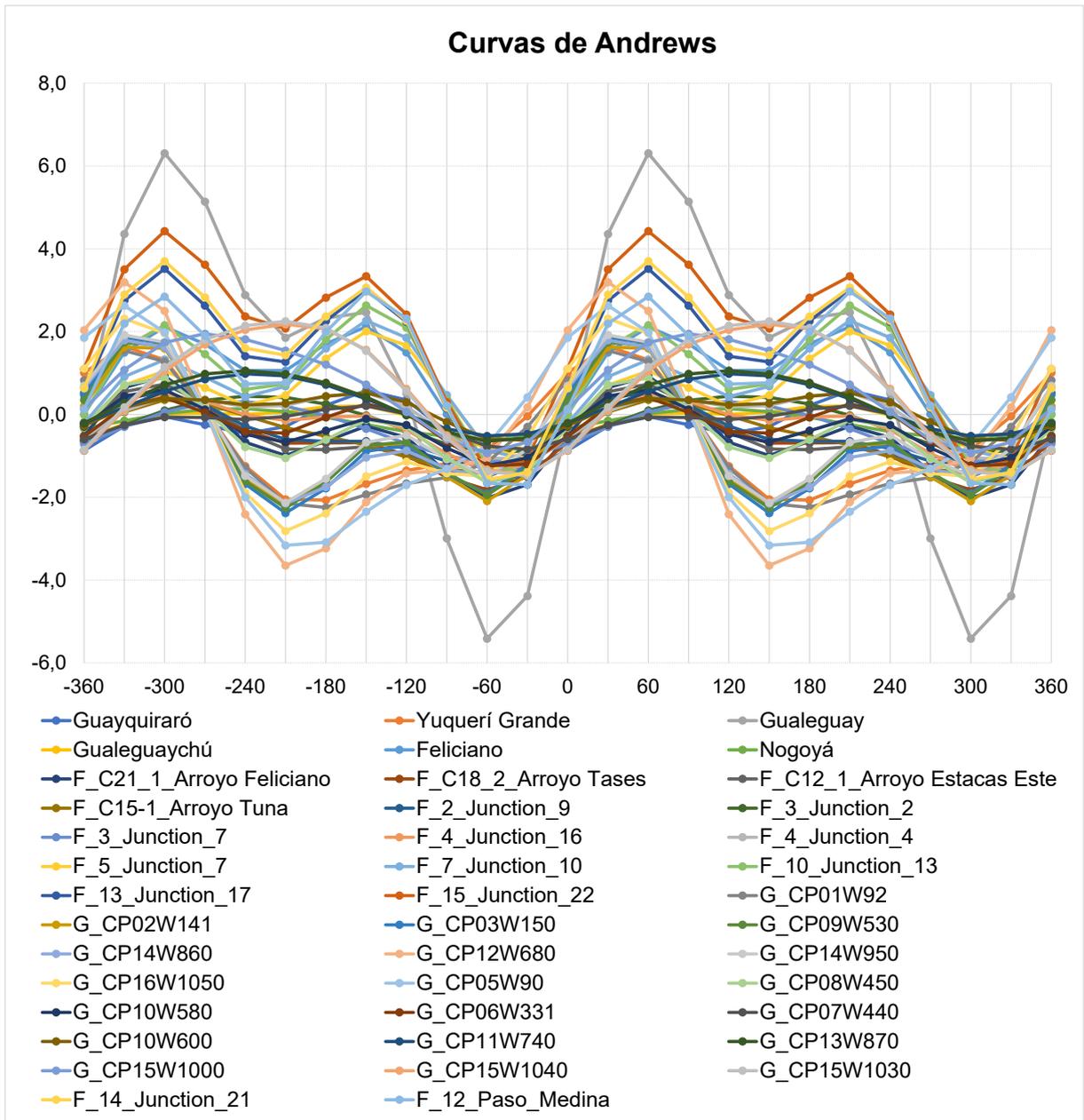


Figura 6.13. Curvas de Andrews de Cuencas y Subcuencas en estudio.

A continuación, se presentan los grupos de cuencas homogéneas obtenidos. Se conformaron tablas con los datos de las cuencas que integran cada grupo. Además, se graficó en el mapa de Entre Ríos la ubicación de las cuencas y subcuencas y, por último, se calcularon y graficaron las Curvas de Andrews para cada grupo.

El grupo 1 se formó con la cuenca del río Gualeguay y cuatro subcuencas pertenecientes a la cuenca del arroyo Feliciano. Éstas cinco componentes del grupo se caracterizaban por tener las áreas más grandes del conjunto de datos de entrada.

Los valores de las variables pertenecientes a la cuenca y subcuencas del grupo 1 se detallan en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Variables de estudio Grupo 1.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
Gualeguay	1.342	16.038	0,00009	318
F_15_Junction_22	1.990	8.210	0,00024	271
F_13_Junction_17	1.573	6.848	0,00024	273
F_14_Junction_21	1.653	7.145	0,00024	273
F_12_Paso_Medina	1.332	5.555	0,00021	275

En la Figura 6.14 se presentan la cuenca y las subcuencas que integraron el Grupo 1 ubicadas en el mapa de Entre Ríos. En esta figura las subcuencas del arroyo Feliciano están superpuestas, por lo que en el grafico se observa completa la de menor superficie (F_14_Junction_21).

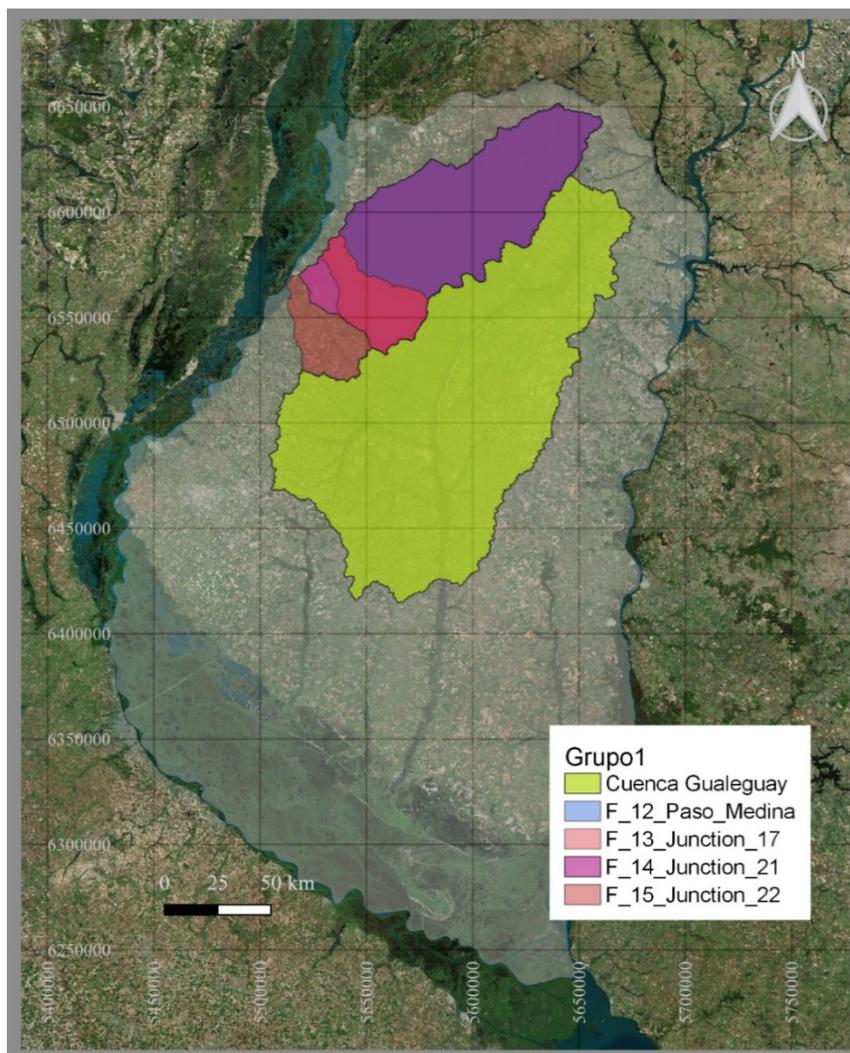


Figura 6.14. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 1.

En la Figura 6.15 se graficaron las Curvas de Andrews del grupo 1, en las que se observa un comportamiento bastante similar, por lo que el agrupamiento realizado se considera correcto.

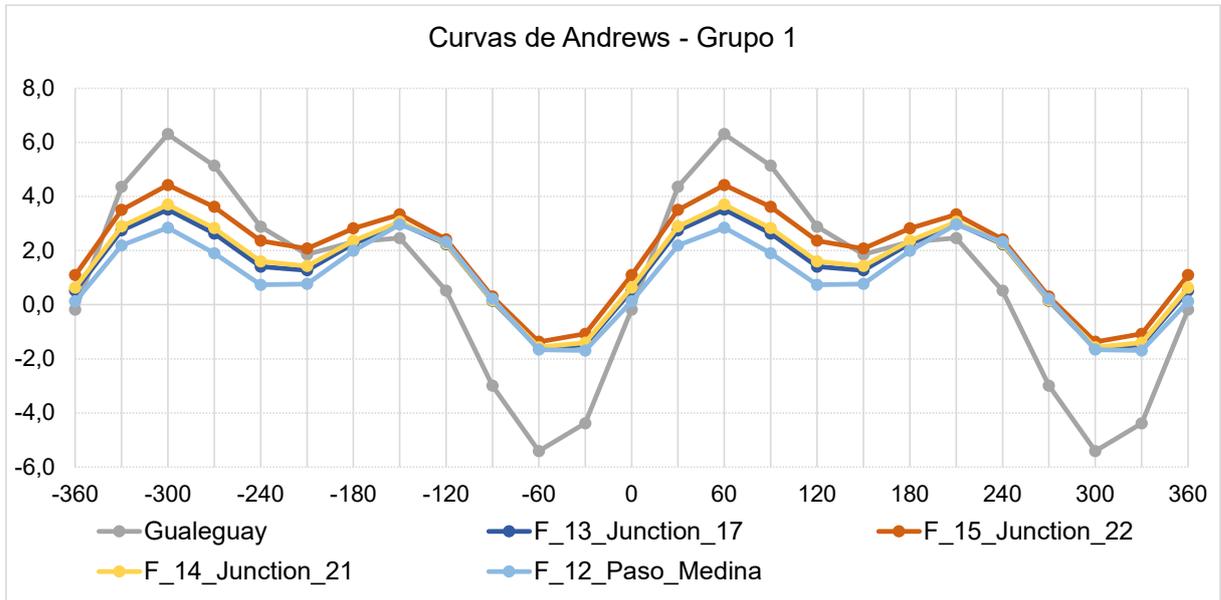


Figura 6.15. Curvas de Andrews Grupo 1.

El grupo 2 se conformó con la cuenca del Yuquerí Grande y ocho subcuencas menores pertenecientes a la cuenca del Gualeguaychú. La principal característica que homogeneizó al grupo fue que las cuencas eran las de áreas pequeñas.

Los valores de las variables pertenecientes a las cuencas y subcuencas del grupo 2 se detallan en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Variables de estudio Grupo 2.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
G_CP12W680	121	396	0,00160	133
G_CP03W150	79	265	0,00101	133
G_CP02W141	50	169	0,00092	133
G_CP09W530	89	322	0,00096	133
G_CP14W860	153	370	0,00104	144
G_CP14W950	243	703	0,00101	138
G_CP16W1050	90	271	0,00125	138
Yuquerí Grande	170	677	0,00117	166
G_CP01W92	40	168	0,00117	166

En la Figura 6.16 se graficaron la cuenca y subcuencas que conformaron el grupo 2 ubicadas en el mapa de Entre Ríos. En esta figura, las subcuencas del río Gualeguaychú no están superpuestas, por lo que se observan de manera completa.

En la Figura 6.17 se graficaron las Curvas de Andrews del grupo 2 que corroboran el resultado de agrupamiento obtenido mediante el análisis de Clúster.

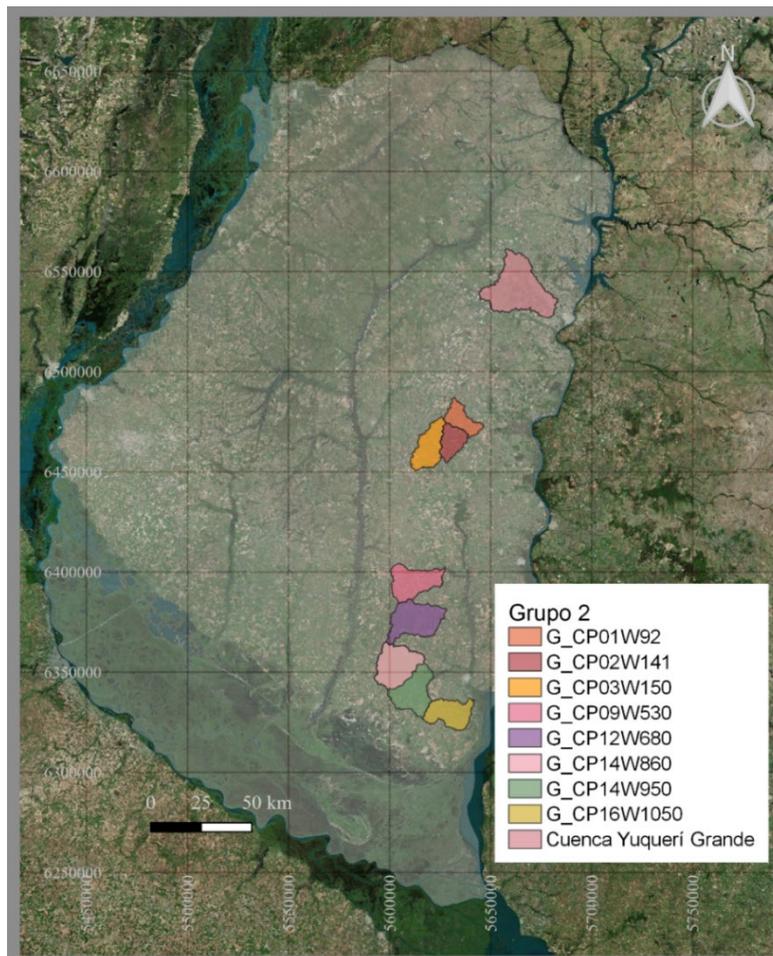


Figura 6.16. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 2.

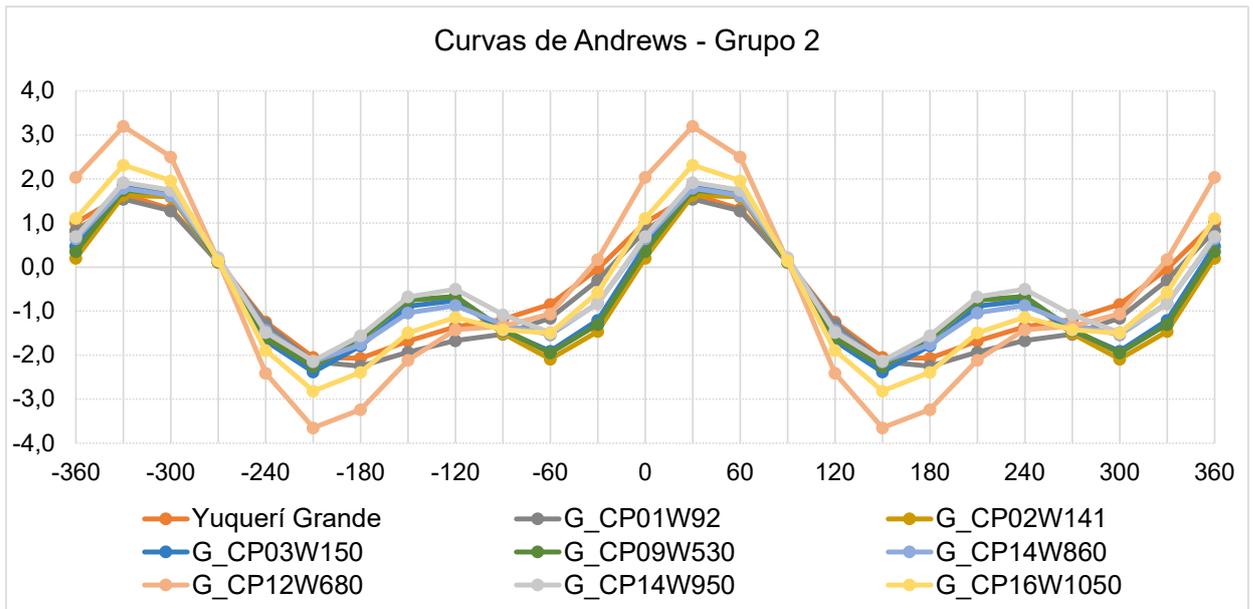


Figura 6.17. Curvas de Andrews Grupo 2.

El grupo 3 se conformó con la cuenca aforada del río Gualeguaychú, cuatro subcuencas pertenecientes a la cuenca del arroyo Feliciano y cuatro subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Gualeguaychú. Las características principales de este grupo fueron que las áreas eran menores a medias y las pendientes altas.

Los valores de las variables pertenecientes a las cuencas y subcuencas del grupo 3 se detallan en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Variables de estudio Grupo 3.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
Gualeguaychú	408	2.029	0,00042	183
G_CP07W440	386	2.280	0,00043	183
G_CP10W580	307	1.302	0,00059	166
G_CP06W331	338	1.686	0,00049	166
G_CP08W450	222	907	0,00063	153
F_2_Junction_9	229	616	0,00065	177
F_C12_1_Arroyo Estacas Este	163	216	0,00069	171
F_C18_2_Arroyo Tases	67	80	0,00058	171
F_C15-1_Arroyo Tuna	173	228	0,00058	184

En la Figura 6.18 se graficaron las Curvas de Andrews del grupo 3 que corroboran el resultado de agrupamiento obtenido mediante el análisis de Clúster.

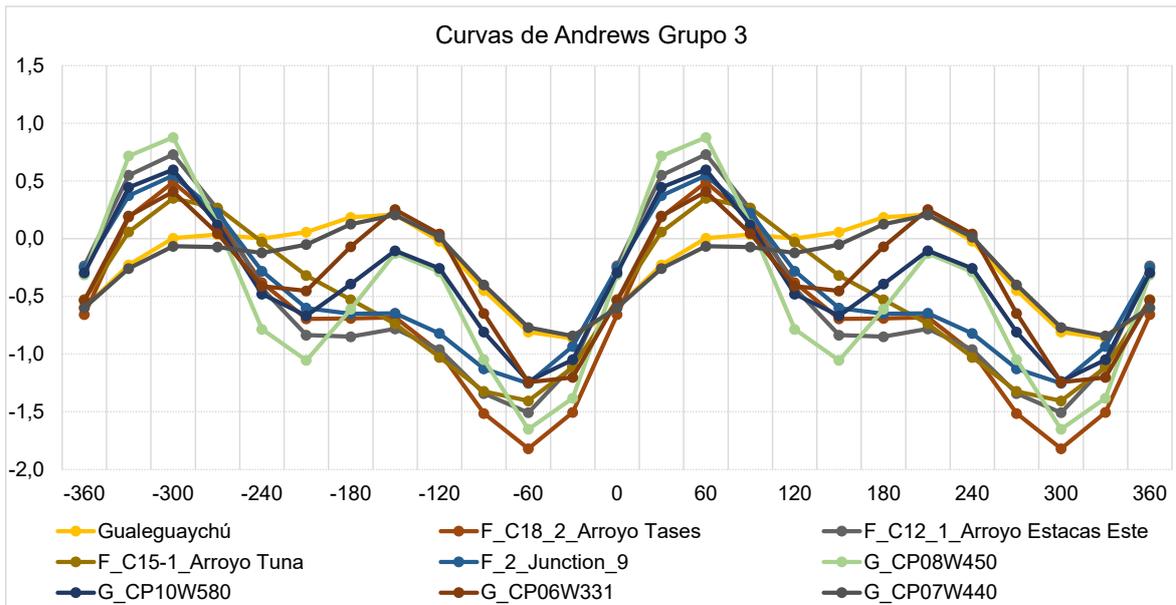


Figura 6.18. Curvas de Andrews Grupo 3.

En la Figura 6.19 se muestra en el mapa de Entre Ríos la ubicación de la cuenca y subcuencas que conformaron el Grupo 3.

En la figura, la subcuenca del arroyo Feliciano F_2_Junction_9 se superpone con las subcuencas F_C12_1_Arroyo Estacas Este, F_C18_2_Arroyo Tases, F_C15-1_Arroyo Tuna. Lo mismo sucede con las subcuencas del río Gualaguaychú, la subcuenca G_CP07W440 se superpone con la subcuenca G_CP06W331, y la subcuenca G_CP08W450 se superpone con G_CP10W580.

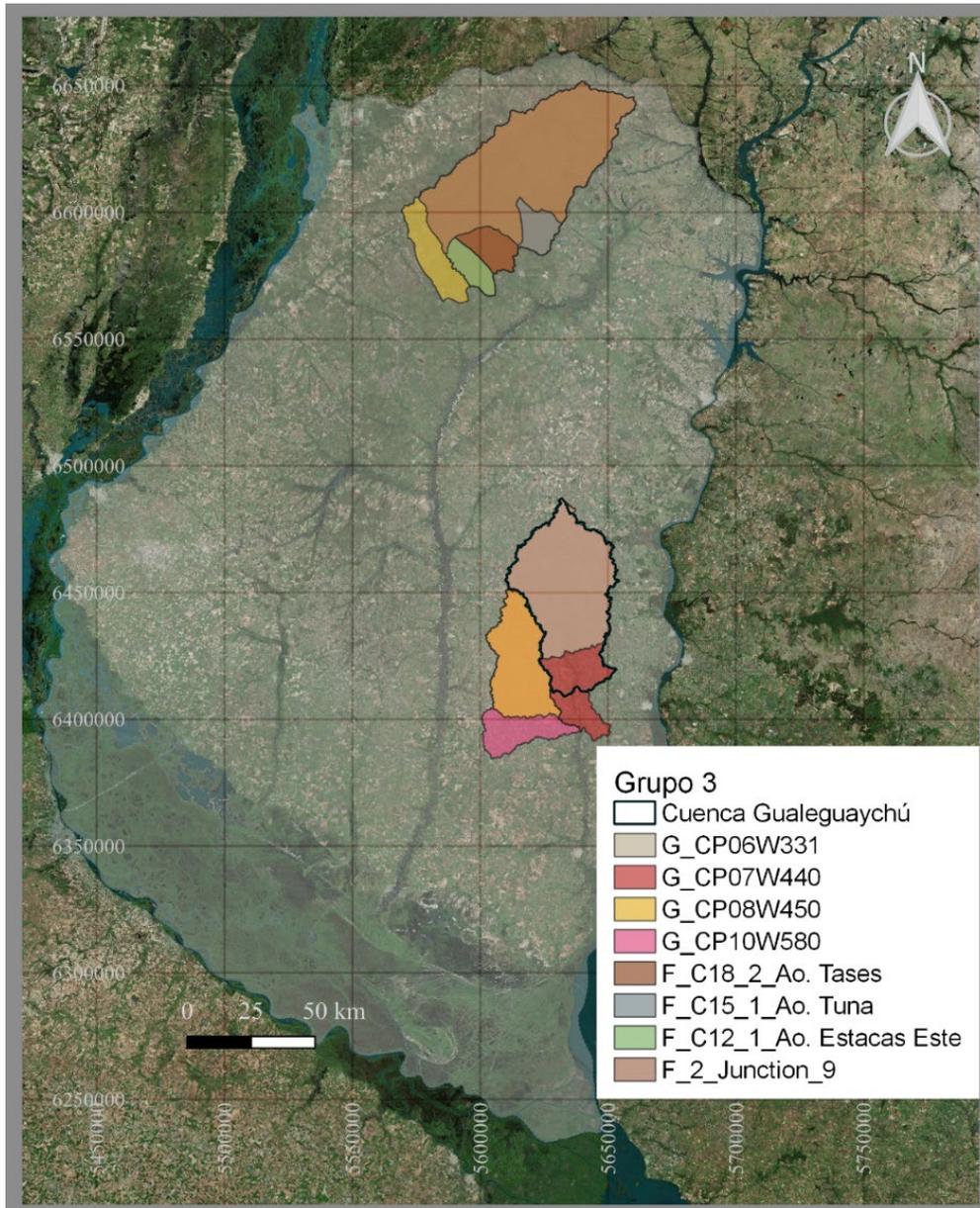


Figura 6.19. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 3.

El grupo 4 se conformó con las cuencas aforadas del arroyo Nogoyá y del río Guayquiraró, cuatro subcuencas pertenecientes a la cuenca del arroyo Feliciano y tres subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Gualeguaychú.

Las características principales de este grupo fueron que las áreas eran medianas a grandes y las pendientes bajas.

Los valores de las variables pertenecientes a las cuencas y subcuencas del grupo 4 se detallan en la Tabla 6.13.

En la Figura 6.20 se muestra en el mapa de Entre Ríos la ubicación de la cuenca y subcuencas que conformaron el grupo 4.

En la figura, las subcuencas del arroyo Feliciano F_3_Junction_2, F_4_Junction_4 y F_4_Junction_16 se superponen, al igual que las subcuencas del río Gualeguaychú G_CP11W740, G_CP13W870 y G_CP10W600.

Tabla 6.13. Variables de estudio Grupo 4.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
G_CP11W740	743	4.762	0,00039	193
G_CP13W870	761	5.094	0,00039	198
Nogoyá	408	3.873	0,00052	194
G_CP10W600	618	3.673	0,00044	180
Guayquiraró	319	3.074	0,00036	224
F_4_Junction_4	511	1.444	0,00038	213
F_4_Junction_16	329	753	0,00048	213
F_3_Junction_2	421	1.095	0,00040	196
F_3_Junction_7	288	740	0,00044	196

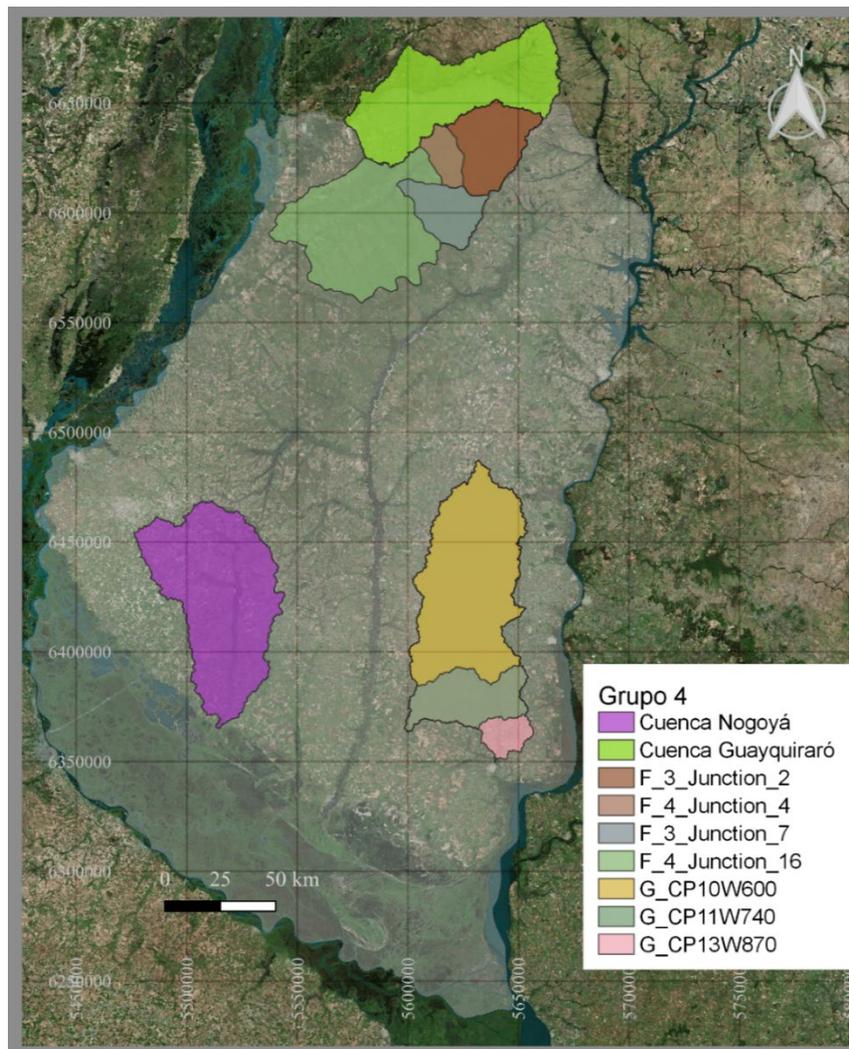


Figura 6.20. Mapa con cuencas y subcuencas del Grupo 4.

En la Figura 6.21 se graficaron las Curvas de Andrews del grupo 4 que corroboran el resultado de agrupamiento obtenido mediante el análisis de Clúster.

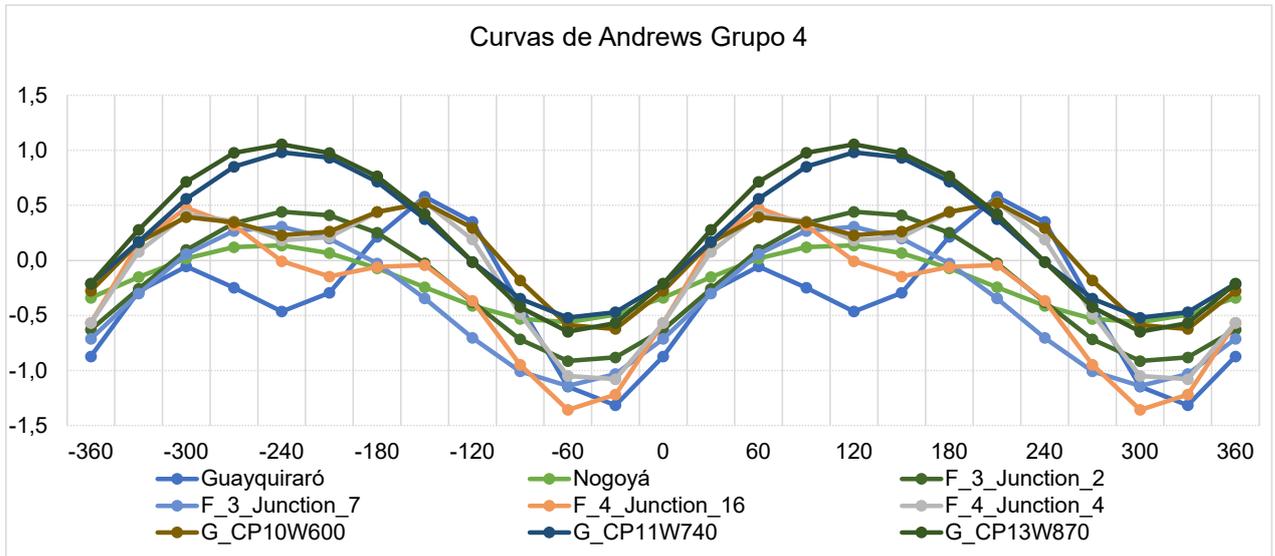


Figura 6.21. Curvas de Andrews Grupo 4.

El grupo 5 se conformó con la cuenca aforada del arroyo Feliciano, tres subcuencas pertenecientes a la cuenca del arroyo Feliciano y tres subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Gualeguaychú. Las características principales de este grupo fueron que las áreas eran grandes y las pendientes bajas.

Los valores de las variables pertenecientes a la cuenca y subcuencas del grupo 5 se detallan en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Variables de estudio Grupo 5.

Cuenca	Q ^{5años} m ³ /s	A km ²	i m/m	PMA ^{5años} mm
G_CP15W1000	1.048	6.971	0,00037	206
G_CP15W1040	993	6.385	0,00000	206
G_CP15W1030	1.011	6.661	0,00000	206
F_5_Junction_7	945	2.437	0,00026	238
F_7_Junction_10	1.060	3.521	0,00022	242
Feliciano	1.182	5.573	0,00024	244
F_10_Junction_13	1.216	4.620	0,00022	259

En la Figura 6.22 se muestra en el mapa de Entre Ríos la ubicación de la cuenca y subcuencas que conformaron el grupo 5.

En la figura, las subcuencas del arroyo Feliciano F_5_Junction_7, F_7_Junction_10 y F_10_Junction_13 se superponen, al igual que las subcuencas del río Gualeguaychú G_CP15W1000, G_CP15W1040 y G_CP15W1030.

En la Figura 6.23 se graficaron las Curvas de Andrews del grupo 5 que corroboran el resultado de agrupamiento obtenido mediante el análisis de Clúster.

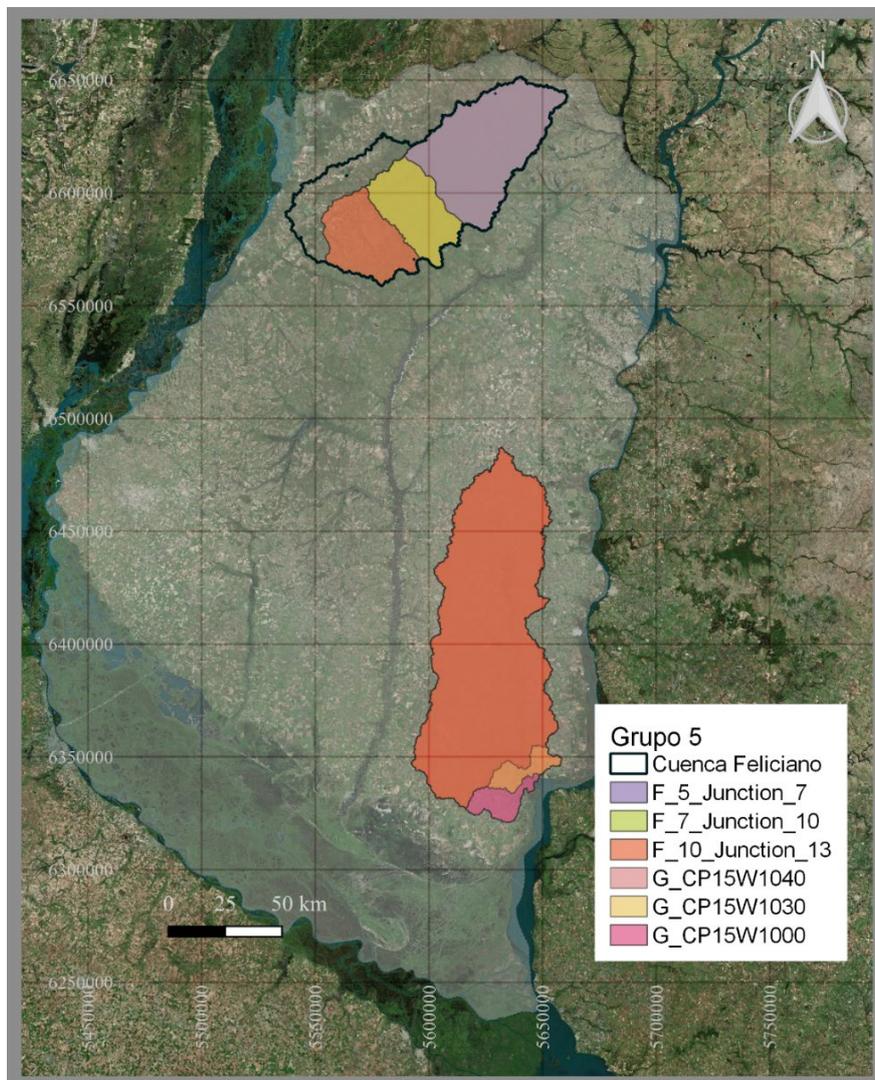


Figura 6.22. Mapa con la cuenca y subcuencas del Grupo 5.

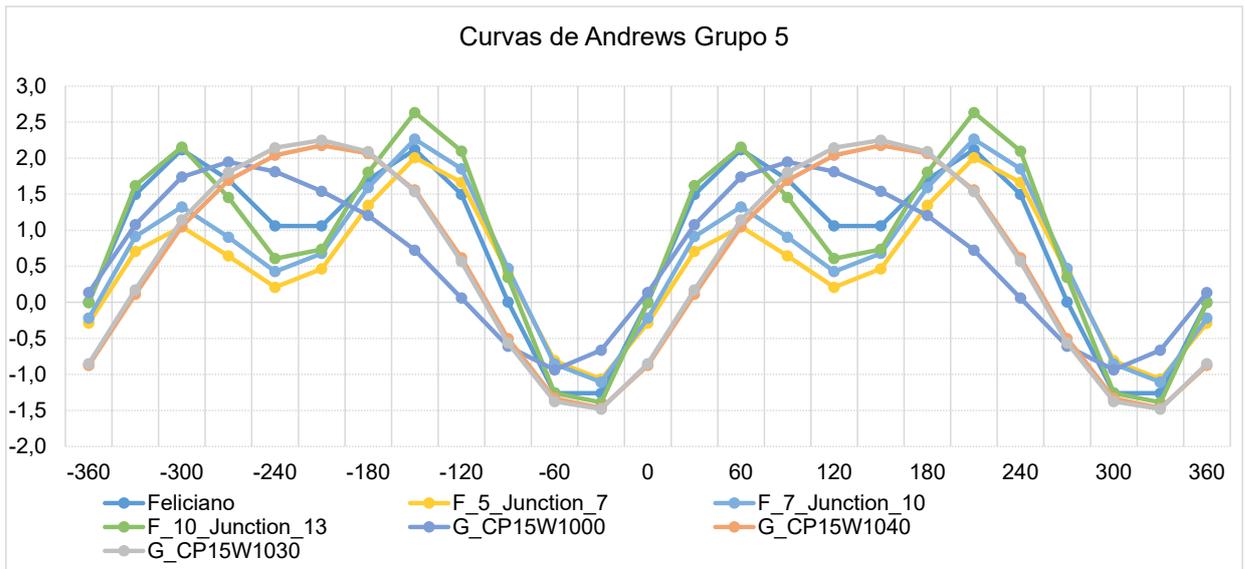


Figura 6.23. Curvas de Andrews Grupo 5.

Este procedimiento se realizó únicamente para la recurrencia de 5 años, pero los agrupamientos se respetaron para obtener las ecuaciones de caudal de cada grupo para todas las recurrencias.

6.7. Ecuación regional de caudales

Luego de establecidos los distintos agrupamientos, se procedió a obtener los coeficientes pertenecientes a las ecuaciones que permitió obtener los valores de caudal máximo para una determinada cuenca según la recurrencia deseada.

En el análisis de regresión se utilizaron las propiedades de los logaritmos para linealizar la ecuación de caudal máximo. Utilizando una función del software Rstudio se aplicó el método "Regresión lineal", de esta manera se obtuvieron coeficientes que relacionan linealmente las variables elegidas y el caudal máximo.

Los coeficientes que se obtuvieron, denominados X, Y, W, Z, se reemplazaron en la siguiente expresión que permite determinar el valor de caudal máximo para una cuenca con determinadas características:

$$\ln(Q_{x\text{años}}) = Z + X * \ln(A) + Y * \ln(P) + W * \ln(PMA_{x\text{años}})$$

siendo Q: caudal máximo, A: área, P: perímetro, PMA: Precipitación Media Areal.

En la Tabla 6.15 se presenta la ecuación de estimación de caudales del Grupo 1 para una recurrencia de 2 años y los valores de las variables utilizadas. Además, los valores de los coeficientes X, Y, Z, W que conformaron la ecuación y el Error porcentual calculado entre el Caudal Máximo conocido (Q) y el Caudal Máximo Estimado.

Tabla 6.15. Ecuación regional de caudal Grupo 1 TR 2 años.

Datos Grupo 1 - TR = 2 años															
Nº	Cuenca	Q	A	ln(A)	X	i	ln(i)	Y	PMA	ln(PMA)	W	Z	ln(Caudal Estimado)	Caudal Estimado	Error (%)
					0.97			1.00			-1.09	12.50			
3	Gualeduay	716	16,038	9.68	0.97	0.00009	-9.34	1.00	236	5.46	-1.09	12.50	6.56	708	-1.02%
20	F_13_Junction_17	1,036	6,848	8.83	0.97	0.00024	-8.34	1.00	186	5.23	-1.09	12.50	6.99	1,091	5.30%
21	F_15_Junction_22	1,361	8,210	9.01	0.97	0.00024	-8.33	1.00	190	5.25	-1.09	12.50	7.15	1,277	-6.18%
41	F_14_Junction_21	1,103	7,145	8.87	0.97	0.00024	-8.34	1.00	191	5.25	-1.09	12.50	7.01	1,106	0.28%
42	F_12_Paso Medina	831	5,555	8.62	0.97	0.00021	-8.46	1.00	185	5.22	-1.09	12.50	6.68	797	-4.07%
Ecuación:		$\text{LN}(Q) = Z + X \times \text{LN}(A) + Y \times \text{LN}(i) + W \times \text{LN}(PMA)$ $\text{LN}(Q) = 12.503 + (0,966) \times \text{LN}(A) + (0,999) \times \text{LN}(i) + (-1.092) \times \text{LN}(PMA)$													
<i>Coefficientes de la ecuación</i>															
X	Coeficiente de Área		0.97												
Y	Coeficiente de Pendiente		1.00												
W	Coeficiente de PMA		-1.09												
Z	Término independiente		12.50												

6.8. Resultados obtenidos

En la tabla 6.16 se presentan los resultados obtenidos para cada una de las recurrencias y grupos.

Tabla 6.16. Ecuación regional de caudal para todos los grupos para todos los tiempos de recurrencia.

$$\ln(Q_{x\text{años}}) = Z + X * \ln(A) + Y * \ln(P) + W * \ln(PMA_{x\text{años}})$$

Grupo	Recurrencia	X	Y	W	Z
1	2	0,966	0,998	-1,092	12,504
2		1,312	0,515	-1,762	7,935
3		0,544	0,832	2,508	-4,544
4		0,004	-1,667	-4,093	13,272
5		0,065	-0,497	-0,979	6,889
1	5	0,841	-0,104	-5,492	29,733
2		1,16	0,487	-1,34	7,699
3		0,568	0,714	1,378	0,03
4		0,138	-1,148	-3,296	13,585
5		0,235	0,142	1,223	-0,489
1	10	0,737	-0,019	-4,357	25,957
2		1,112	0,457	-1,511	9,199
3		0,596	0,876	1,012	3,049
4		0,197	-0,336	-1,967	12,946
5		0,295	-0,954	-0,626	0,387
1	20	0,858	0,441	-1,966	15,492
2		1,106	0,367	-1,762	10,418
3		0,613	1,042	0,867	5,054
4		0,167	0,33	-1,639	16,927
5		0,272	-1,977	-1,423	-3,042
1	50	0,842	0,619	0,332	3,781
2		0,93	0,32	-4,716	27,662
3		0,645	1,124	0,971	4,944
4		0,615	1,213	1,299	4,125
5		0,122	-1,549	-0,8	-1,515
1	100	0,857	0,576	0,153	4,504
2		0,979	0,325	-2,552	16,335
3		0,648	1,394	0,864	7,642
4		0,27	1,237	-0,491	17,338
5		0,093	-2,049	-1,118	-3,237

6.9. Análisis de los resultados obtenidos

Obtenidas las ecuaciones de caudal para cada grupo de cuencas y subcuencas en función de la recurrencia, se pudo verificar que la regionalización obtenida con los métodos estadísticos era correcta descartando aquellas subcuencas que no cumplían con los requisitos de verificación y distorsionaban las características de cada grupo.

Se procedió a determinar las características que definieron cada grupo, para ello se analizaron el área y pendiente de las cuencas y subcuencas que conformaban cada uno y se obtuvieron los resultados descritos a continuación.

En las Tablas 6.17 a 6.21 se presentaron para cada recurrencia (TR) las cuencas y subcuencas que cumplían o no con la condición de relación entre caudal conocido y caudal estimado menor al 30%. En color verde se representaron las cuencas y subcuencas que cumplieron con este criterio y en rojo las que no lo hicieron.

- Grupo 1:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 5.000 y 16.100 km² y bajas pendientes, entre 0,00021 y 0,00024 m/m. Se decidió incluir dentro de este grupo la cuenca del Gualeguay y la subcuenca del Feliciano en Paso Medina las cuales según el análisis de clúster no pertenecían a este grupo, pero sus parámetros se asemejaban a las restantes y eran necesarias para poder aplicar el método de regresión lineal.

Tabla 6.17. Errores relación de caudales Grupo 1.

Grupo 1								
Cuenca	Superficie km ²	i m/m	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100
Gualeguay	16,038	0.00009	0.30%	0.05%	0.00%	0.03%	0.12%	0.10%
F_13_Junction_17	6,848	0.00024	6.57%	-1.05%	-0.43%	-0.60%	1.92%	1.65%
F_15_Junction_22	8,210	0.00024	-5.05%	-1.52%	-0.26%	-0.96%	-2.29%	-1.76%
F_14_Junction_21	7,145	0.00024	1.49%	3.10%	0.74%	1.89%	1.51%	0.99%
F_12_Paso Medina	5,555	0.00021	-2.92%	-0.51%	-0.05%	-0.33%	-1.20%	-0.94%
Referencias								
Error menor al 30%								
Error mayor al 30%								

- **Grupo 2:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas pequeñas, entre 160 y 710 km² y pendientes altas, entre 0,00092 y 0,0016 m/m.

Tabla 6.18. Errores relación de caudales Grupo 2.

Grupo 2								
Cuenca	Superficie km ²	i m/m	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100
G_CP12W680	396	0.00101	-5.07%	-0.29%	4.46%	4.80%	3.09%	4.61%
G_CP03W150	265	0.00096	-4.58%	-4.53%	-4.20%	-3.03%	0.43%	-1.49%
G_CP02W141	170	0.00101	-9.32%	-7.63%	-7.03%	-7.14%	-1.71%	-4.31%
G_CP09W530	322	0.00104	2.67%	0.87%	-2.73%	-2.85%	-19.55%	-9.26%
G_CP14W860	370	0.00160	-5.08%	-5.69%	-5.91%	-7.48%	-4.71%	-6.50%
G_CP14W950	703	0.00125	7.13%	3.79%	1.39%	1.26%	-5.16%	1.97%
G_CP16W1050	271	0.00154	5.15%	6.60%	7.82%	9.80%	6.89%	8.15%
Yuquerí Grande	677	0.00117	-2.23%	-1.33%	-0.47%	-0.55%	15.09%	1.42%
G_CP01W92	168	0.00092	13.42%	9.50%	7.95%	6.62%	9.87%	6.86%
Referencias								
Error menor al 30%								
Error mayor al 30%								

- **Grupo 3:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo eran áreas menores a medias, entre 70 y 2300 km² y altas pendientes, entre 0,00042 y 0,00069.

Tabla 6.19. Errores relación de caudales Grupo 3.

Cuenca	Superficie km ²	i m/m	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100
Gualeguaychú	2.029	0,00042	-3,17%	-3,65%	-3,63%	-1,01%	-6,01%	1,52%
G_CP07W440	2.281	0,00043	13,62%	12,14%	8,97%	6,26%	-1,03%	3,75%
G_CP10W580	1.302	0,00059	9,55%	12,17%	8,61%	7,78%	0,92%	6,39%
G_CP06W331	1.687	0,00049	-12,19%	-13,07%	-10,60%	-10,55%	3,16%	-10,05%
G_CP08W450	907	0,00063	-1,56%	1,20%	2,88%	3,53%	11,48%	3,51%
F_2_Junction_9	616	0,00065	-5,26%	-7,70%	-21,31%	-22,32%	-37,20%	-21,49%
F_C12_1_Arroyo Estacas Este	216	0,00069	4,67%	0,85%	-6,51%	-6,02%	-13,91%	-4,72%
F_C18_2_Arroyo Tases	80	0,00058	4,33%	3,76%	7,83%	7,53%	7,59%	6,26%
F_C15-1_Arroyo Tuna	228	0,00058	-7,22%	-2,89%	-5,44%	-5,75%	-30,18%	-5,33%
Referencias								
Error menor al 20%								
Error mayor al 20%								

- **Grupo 4:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 740 y 5.100 km² y bajas pendientes, entre 0,00036 y 0,00052 m/m.

Tabla 6.20. Errores relación de caudales Grupo 4.

Grupo 4								
Cuenca	Superficie km ²	i m/m	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100
G_CP11W740	4,763	0.00039	-2.67%	-3.87%	-11.5%	-2.29%	-14.26%	-8.21%
G_CP13W870	5,096	0.00039	-17.25%	-16.25%	-18.6%	-8.90%	-9.09%	-9.98%
Nogoyá	3,873	0.00052	7.44%	2.32%	-0.1%	-9.05%	1.35%	-17.62%
G_CP10W600	3,674	0.00044	5.50%	10.07%	16.3%	13.42%	-4.05%	30.82%
Guayquiraró	3,074	0.00036	24.07%	29.39%	52.3%	38.25%	75.47%	57.40%
F_4_Junction_4	1,444	0.00038	-16.52%	-22.33%	-26.0%	-31.97%	-25.86%	-38.78%
F_4_Junction_16	753	0.00048	-22.19%	-15.43%	-7.6%	1.66%	15.10%	15.54%
F_3_Junction_2	1,095	0.00040	7.72%	7.65%	-3.0%	-6.33%	-20.21%	-15.84%
F_3_Junction_7	740	0.00044	26.19%	20.54%	18.2%	21.61%	10.42%	19.85%
Referencias								
Error menor al 30%								
Error mayor al 30%								

- **Grupo 5:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, aunque menores a las del Grupo 1, entre 2.400 y 7.000 km² y bajas pendientes, entre 0,00022 y 0,00038.

Tabla 6.21. Errores relación de caudales Grupo 5.

Grupo 5								
Cuenca	Superficie km ²	i m/m	TR 2	TR 5	TR 10	TR 20	TR 50	TR 100
G_CP15W1000	6,974	0.00037	-4.60%	-0.48%	-0.20%	0.66%	0.79%	1.80%
G_CP15W1040	6,388	0.00038	3.34%	-0.72%	-0.13%	-1.12%	-0.67%	-2.06%
G_CP15W1030	6,664	0.00037	-0.67%	1.06%	1.12%	1.47%	1.24%	1.37%
F_5_Junction_7	2,437	0.00026	-0.01%	0.16%	-2.05%	-2.35%	-3.23%	-2.47%
F_7_Junction_10	3,521	0.00022	3.03%	-0.06%	5.30%	6.49%	8.75%	7.37%
Feliciano	5,573	0.00024	10.77%	0.71%	-1.08%	-1.36%	-2.00%	-1.22%
F_10_Junction_13	4,620	0.00022	-10.51%	-0.65%	-2.75%	-3.46%	-4.33%	-4.35%
Referencias								
Error menor al 30%								
Error mayor al 30%								

Los grupos no resultaron fácilmente clasificables debido a que las características físicas e hidrológicas de las variables utilizadas para definirlos resultaron muy dispares para conformar grupos homogéneos, y a la escasez de cuencas con datos medidos que sirvan de entrada para el estudio.

En cuanto a los parámetros hidrológicos el método de obtención de caudales máximos varía entre las cuencas aforadas y modeladas, siendo en las aforadas obtenido mediante el análisis de frecuencia y en las modeladas mediante la modelación hidrológica. Además, la Precipitación Media Areal tiene mucha variabilidad para las cuencas, lo que se debe a que se trata de una variable aleatoria que presenta disparidad aún en una región considerada climáticamente homogénea y es sabido que no existe una relación lineal entre precipitaciones y caudales, ya que intervienen otras variables como la humedad antecedente de la cuenca.

En la Figura 6.24 se graficó la distribución de cuencas y subcuencas según las características físicas de área y pendiente. Se puede observar que los grupos obtenidos y descritos anteriormente se mezclan en algunos casos ya que las cuencas pertenecientes a diferentes grupos comparten alguna de las características, como el Grupo 1 con el Grupo 5. Sin embargo, algunos grupos están bien definidos como el Grupo 2.

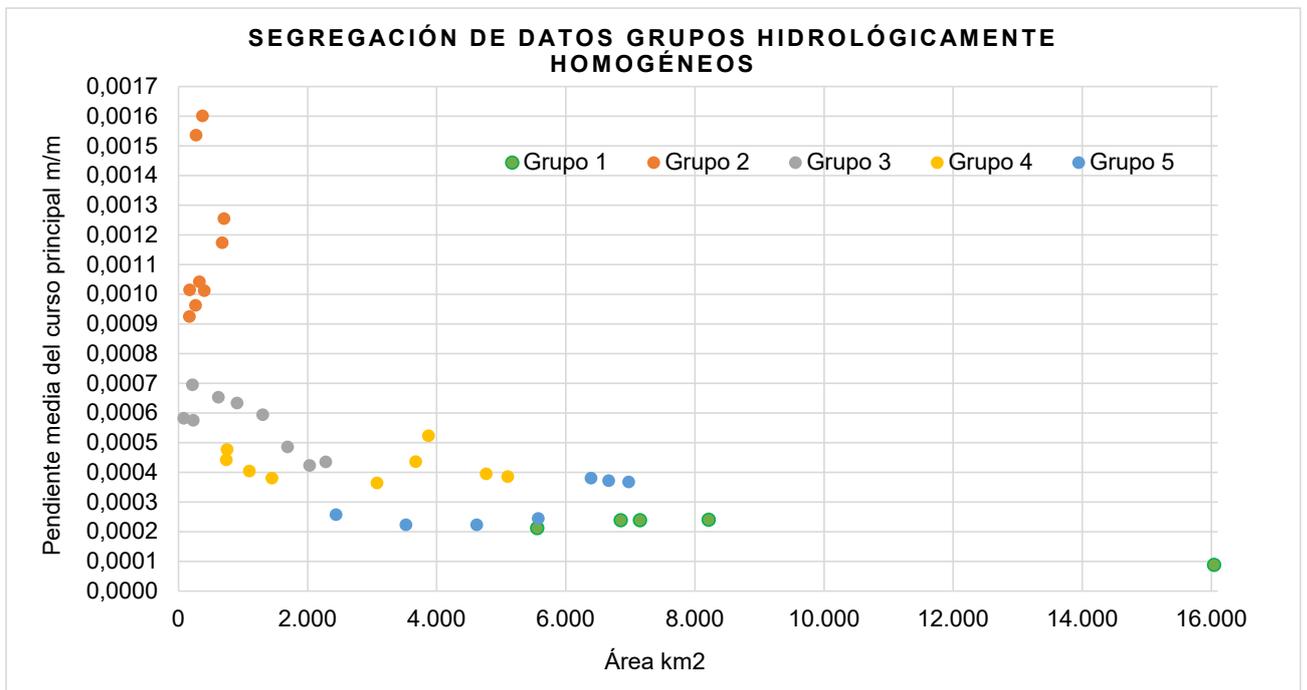


Figura 6.24. Segregación de grupos.

7. Discusión de resultados

Al momento de comparar los resultados de las investigaciones de las grandes cuencas (Cuenca del Arroyo Feliciano – Capítulo 4 – y Cuenca del Río Gualeguay – Capítulo 5) con los de la investigación a nivel provincial (Capítulo 7) se puede notar que los resultados no son iguales. Tanto la regionalización como las ecuaciones de estimación de caudal son diferentes.

Debido a las diferencias y a la necesidad de corroborar los resultados obtenidos, se decidió realizar una comparación de caudales estimados a partir de las ecuaciones resultantes de las distintas investigaciones y verificarlos con los caudales observados en los modelos calibrados.

Para realizar la verificación se seleccionaron las subcuencas de Paso Medina y Ruta Provincial N°39, las cuales se cuentan con datos de mediciones.

7.1. Comparación de las subcuencas del arroyo Feliciano

7.1.1. Cuenca Paso Medina

7.1.1.1. Datos

- *Area* = 5555.41 km²
- *Perimetro* = 401.9 km
- *Pendiente* = 0.0002121
- *Longitud de cauce* = 210.4 km
- Caudales observados:

- $Q_{obs_{2años}} = 830.7 \frac{m^3}{s}$

- $Q_{obs_{10años}} = 1662.6 \frac{m^3}{s}$

7.1.1.2. Parámetros

- *Tiempo de concentracion* = $\frac{0.871 * (\text{longitud del cauce})^3}{(\text{longitud del cauce} * \text{pendiente})}^{0.385} = 105.914 \text{ hs}$
- *Duracion de tormenta* = *Tiempo de concentracion* * 2.5 = 264.78 hs
- $K_c = \frac{\text{Perimetro}}{2\sqrt{\pi \text{Area}}} = 1.521$

7.1.1.3. Cálculo de la Precipitación Media areal.

Cálculo de Precipitación Media de la Estación de Referencia (PM ER)

La elección se realiza en función del área, debe adoptarse la cuenca cuya área es la más cercana. En este caso a la estación de Paso Medina. (Figura 7.1)

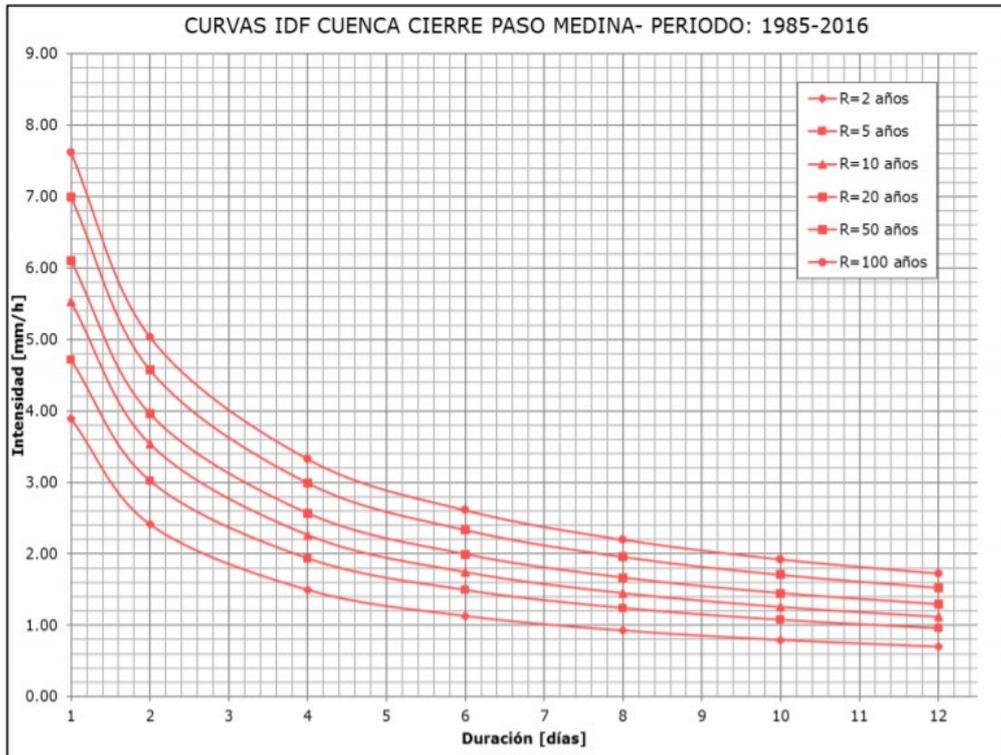


Figura 7.1 Curvas IDF. Cuenca del arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina.

$$I_{R=2 \text{ años}} = \frac{592.60}{(d + 1.55)^{0.691}}$$

A través de las ecuaciones se determina la intensidad de la tormenta correspondiente a un periodo de retorno de 2 años, en $\left(\frac{mm}{hs}\right)$.

Para el cálculo de la PM ER, multiplicaremos la intensidad calculada por la duración de la tormenta adoptada:

$$PM (ER) = I \left[\frac{mm}{hs} \right] \times d [hs] = 185.2$$

Coeficientes de Decaimiento Areal

La precipitación media difiere del máximo local, por eso habitualmente en los estudios hidrológicos se estima la precipitación de diseño afectando a la precipitación media por el coeficiente de abatimiento areal. En este caso al ser la estación de referencia no se calcula

Cálculo del Precipitación Media Areal de la cuenca estudiada (PMA X)

Cuando se determinaron tanto la intensidad, como ambos coeficientes de abatimiento areal, se calcula la PMA de la cuenca en (mm/hs):

$$PMA(X) = PMA(ER) = 185.21$$

- Se Aplica misma metodología para calcular la precipitación media areal de 10 años.

$$PMA_{10años} = 314.68 \text{ mm}$$

7.1.1.4. Resultado con las ecuaciones de la investigación de la cuenca particular.

En la figura 7.2 se presenta el árbol de decisiones propuesto en la investigación.

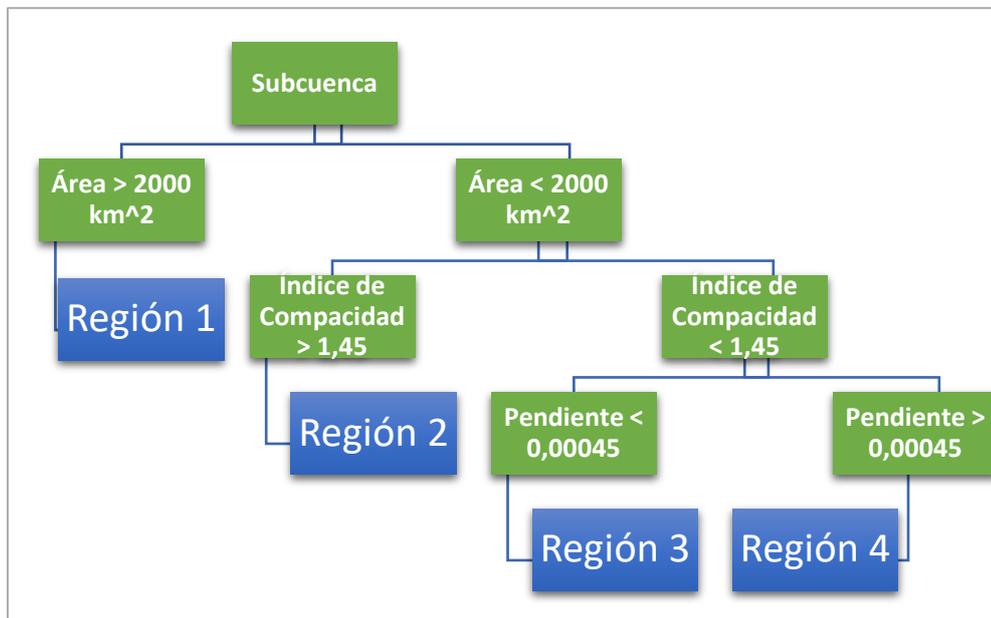


Figura 7.2. árbol de decisiones.

Area > 2000 km² →→ Region 1

$$\ln * Q_{2años} = 11.7187 + 0.6216 * \ln(Area) + 1.143 * \ln(Pendiente) - 0.1275$$

$$* \ln(PMA_{2 años}) = 6.7373$$

Cálculo de caudal

Cálculo de error con lo observado

$$Q_{2años} = e^{\ln * Q_{2años}} = 843.29 \frac{m^3}{s}$$

$$Error(\%) = \frac{843.29}{830.7} - 1 = 1,51\%$$

$$Q_{10años} = Q_{2años} * IC = 843.29 * 0.638 \ln(10) + 0.495 = 1656.27$$

Cálculo de caudal

Cálculo de error con lo observado

$$Q_{10años} = 1656.27 \frac{m^3}{s}$$

$$Error(\%) = \frac{1656.27}{1662.6} - 1 = 0,38\%$$

7.1.1.5. Resultado con las ecuaciones de la investigación a nivel provincial.

En la figura 7.3 se presenta el árbol de decisiones propuesto en la investigación.

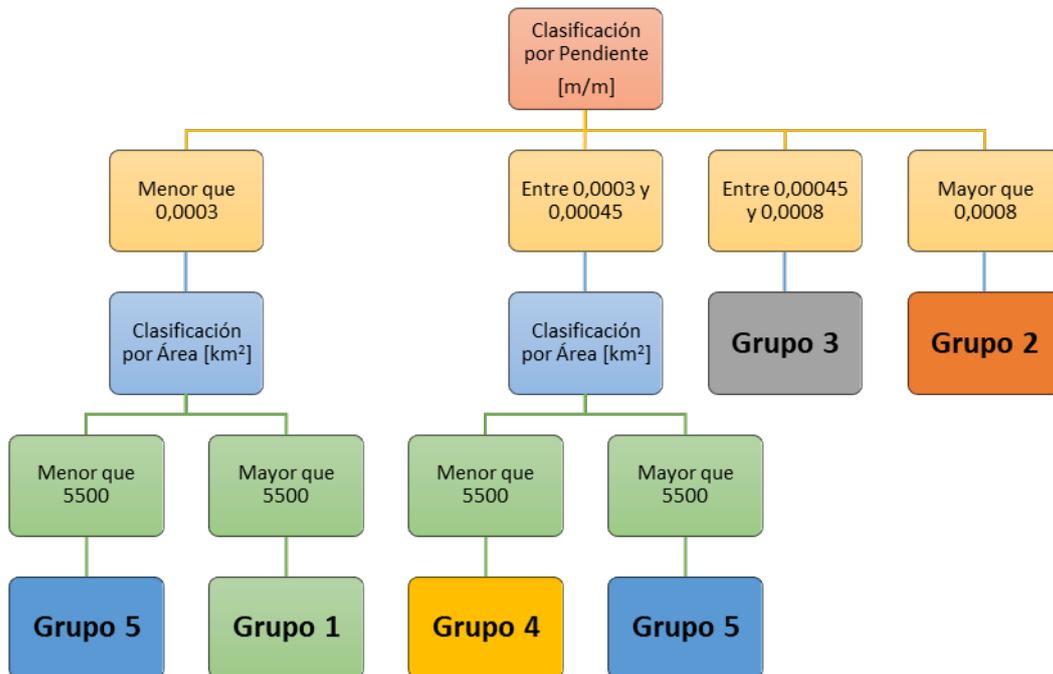


Figura 7.3. árbol de decisiones.

$Pendiente < 0.0003 \forall > Area > 5500 \text{ km}^2 \rightarrow \rightarrow \text{Grupo 5}$

$$\ln * Q_{2\text{años}} = 12.503 + 0.966 * \ln(Area) + 0.9978 * \ln(Pendiente) - 1.09235 * \ln(PMA_{2\text{ años}}) = 6.688$$

Cálculo del caudal

Cálculo de error con lo observado

$$Q_{2\text{años}} = e^{\ln * Q_{2\text{años}}} = 803.115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Error(\%) = \frac{803.11}{830.7} - 1 = \mathbf{3,32}$$

$$\ln * Q_{10\text{años}} = 25.95 + 0.737 * \ln(Area) - 0.0189 * \ln(Pendiente) - 4.357 * \ln(PMA_{10\text{ años}}) = 7.405$$

Cálculo del caudal

Cálculo de error con lo observado

$$Q_{10\text{años}} = e^{\ln * Q_{10\text{años}}} = 803.115 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Error(\%) = \frac{Q_{10\text{años}}}{Q_{obs_{10\text{años}}} - 1 = \mathbf{1.098\%}$$

7.1.2. Otros resultados de las comparaciones

En la Tabla 7.1 se reflejan los resultados de otras comparaciones con sus respectivos errores.

Tabla 7.1. Comparaciones en otras subcuencas.

Subcuencas del Arroyo Feliciano					
Subcuencas	Caudales de 2 años				
	Observados	Inv. Arroyo Feliciano	Error	Inv. Nivel Provincial	Error
	m3/s	m3/s	(%)	m3/s	(%)
Arroyo Tuna	118	121.5	2.97%	87.08	-26.20%
F_10 Junction 13	764.7	800.16	4.64%	642.97	-15.92%
F_14_Juntion 21	1103	1121.59	1.69%	1114.55	1.05%
F_2_Juntion 19	229	248.71	8.61%	188.8	-17.55%
F_4_Juntion 16	247	221.05	-10.51%	192.2	-22.19%

Subcuencas del Arroyo Feliciano					
Subcuencas	Caudales de 10 años				
	Observados	Inv. Arroyo Feliciano	Error	Inv. Nivel Provincial	Error
	m3/s	m3/s	(%)	m3/s	(%)
Arroyo Tuna	224.4	231.77	3.28%	170.71	-23.93%
F_10 Junction 13	1530.5	1571.56	2.68%	1487.19	-2.83%
F_14_Juntion 21	2091	2202.87	5.35%	2093.62	0.13%
F_2_Juntion 19	479	474.44	-0.95%	360.89	-24.66%
F_4_Juntion 16	411	421.66	2.59%	380.24	-7.48%

7.2. Comparación de las subcuencas del río Gualeguaychú

7.2.1. Cuenca del río Gualeguaychú

7.2.1.1. Datos

- $Area = 2029 \text{ km}^2$
- $Perimetro = 420 \text{ km}$
- $Pendiente = 0.0004229$
- $Longitud \text{ de cauce} = 113.5 \text{ km}$
- Caudales observados:

- $Q_{obs_{2años}} = 265 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
- $Q_{obs_{10años}} = 493 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

7.2.1.2. Parámetros

- $Tiempo \text{ de concentración} = \frac{0.871 * (longitud \text{ del cauce})^3^{0.385}}{(longitud \text{ del cauce} * pendiente)} = 50.47 \text{ hs}$
- $Duracion \text{ de tormenta} = Tiempo \text{ de concentración} * 2.5 = 126.19 \text{ hs}$
- $K_c = \frac{Perimetro}{2\sqrt{\pi Area}} = 2.6303$

7.2.1.3. Cálculo de la Precipitación Media areal.

Cálculo de Precipitación Media de la Estación de Referencia (PM ER)

La elección se realiza en función del área, debe adoptarse la cuenca cuya área es la más cercana. En este caso a la estación de Ruta Provincial N°39. (Figura 7.4)

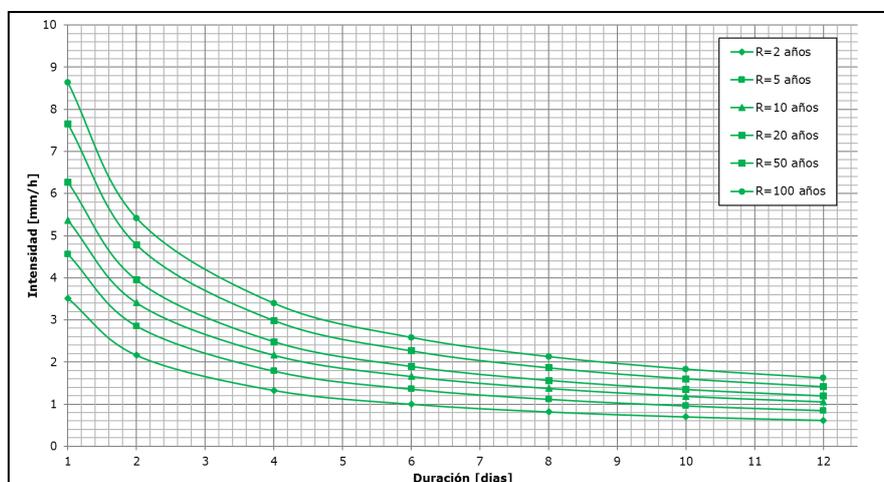


Figura 7.4 Curvas IDF. Cuenca del río Gualeguaychú con cierre en RP39.

$$I_{R=2 \text{ años}} = \frac{584,04}{(d + 1,56)^{0,703}}$$

A través de las ecuaciones se determina la intensidad de la tormenta correspondiente a un periodo de retorno de 2 años, en $\left(\frac{mm}{hs}\right)$.

Para el cálculo de la PM ER, multiplicaremos la intensidad calculada por la duración de la tormenta adoptada:

$$PM (ER) = I \left[\frac{mm}{hs} \right] \times d [hs] = 137.057$$

Coeficientes de Decaimiento Areal

La precipitación media difiere del máximo local, por eso habitualmente en los estudios hidrológicos se estima la precipitación de diseño afectando a la precipitación media por el coeficiente de abatimiento areal. En este caso al ser la estación de referencia no se calcula

Cálculo del Precipitación Media Areal de la cuenca estudiada (PMA X)

Cuando se determinaron tanto la intensidad, como ambos coeficientes de abatimiento areal, se calcula la PMA de la cuenca en (mm/hs):

$$PMA (X) = PMA (ER) = 137.057$$

- Se Aplica misma metodología para calcular la precipitación media areal de 10 años.

$$PMA_{10 \text{ años}} = 227.76mm$$

7.2.1.4. Resultado con las ecuaciones de la investigación de la cuenca particular.

En la figura 7.5 se presenta el árbol de decisiones propuesto en la investigación.

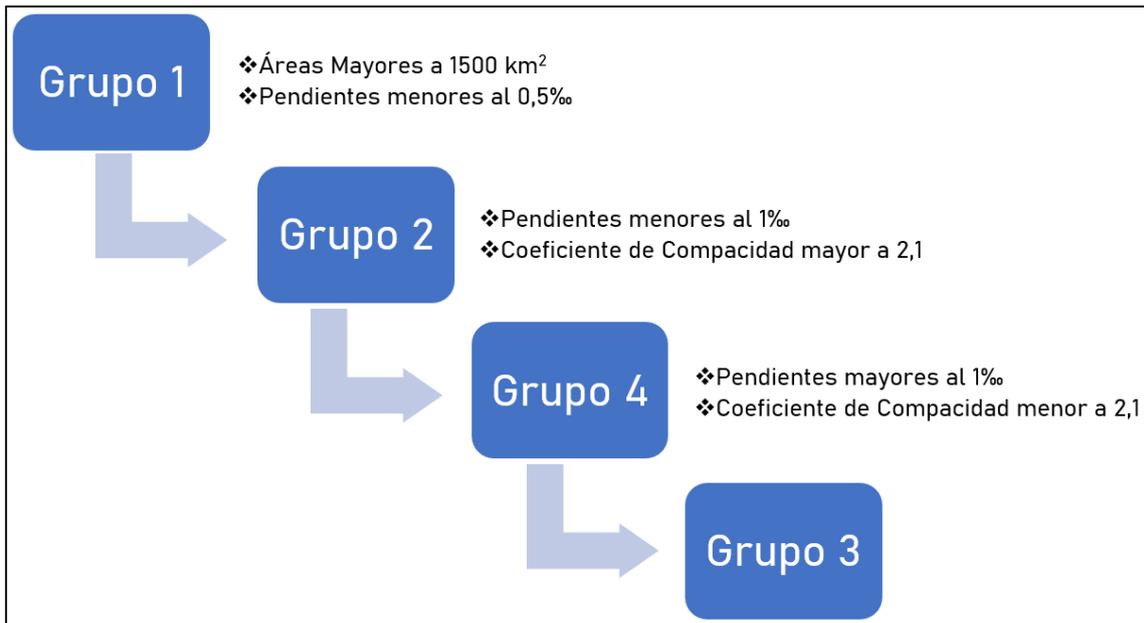


Figura 7.5. árbol de decisiones.

Area mayor a 1500 km² y pendiente menor a 0.0005 →→ Grupo 1

$$\log * Q_{2\text{años}} = 2.72 + 1.03 * \ln(\text{Area}) + 1.23 * \ln(\text{Pendiente}) - 0.1473$$

$$* \ln(\text{PMA}_{2\text{ años}}) = 2.312$$

Cálculo de caudal

$$Q_{2\text{años}} = 10^{\log * Q_{2\text{años}}} = 205.30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo de error con lo observado

$$\text{Error}(\%) = \frac{843.29}{830.7} - 1 = -22\%$$

Cálculo de caudal

$$Q_{10\text{años}} = Q_{2\text{años}} * IC = 205.3 * 1.97$$

$$= 404.44$$

Cálculo de error con lo observado

$$\text{Error}(\%) = \frac{404.44}{493} - 1 = -17$$

7.2.1.5. Resultado con las ecuaciones de la investigación a nivel provincial.

Pendiente entre 0.0003 y 0.00045 →→ Grupo 3

*Mirar figura 7.2

$$\ln * Q_{2\text{años}} = -4.544 + 0.5389 * \ln(\text{Area}) + 0.8322 * \ln(\text{Pendiente}) + 2.508$$

$$* \ln(\text{PMA}_{2\text{ años}}) = 5.3981$$

Cálculo del caudal

$$Q_{2\text{años}} = e^{\ln * Q_{2\text{años}}} = 220.99 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo de error con lo observado

$$Error(\%) = \frac{220.99}{265} - 1 = -18\%$$

$$\ln * Q_{10años} = 3.04855 + 0.596 * \ln(Area) + 0.876 * \ln(Pendiente) + 1.011$$

$$* \ln(PMA_{10 años}) = 6.116$$

Cálculo del caudal

Cálculo de error con lo observado

$$Q_{10años} = e^{\ln * Q_{10años}} = 453.45 \frac{m^3}{s}$$

$$Error(\%) = \frac{Q_{10años}}{Q_{obs_{10años}}} - 1 = -8.02$$

7.2.2. Resultados de otras subcuencas del río Gualeguaychú

En la Tabla 7.2 se reflejan los resultados de otras comparaciones con sus respectivos errores.

Tabla 7.2. Comparaciones en otras subcuencas.

Subcuencas del Rio Gualeguaychu					
Subcuencas	Caudales de 2 años				
	Observados	Inv. Rio Gualeguaychu	Error	Inv. Nivel Provincial	Error
	m3/s	m3/s	(%)	m3/s	(%)
G_CP08W450	123	126.47	2.82%	132.16	7.45%
G_CP15W1000	666.8	631.66	-5.27%	632.99	-5.07%
G_CP16W1050	48	54.2	12.92%	52.65	9.69%
G-CP15W1040	620.3	598.85	-3.46%	637.78	2.82%

Subcuencas del Rio Gualeguaychu					
Subcuencas	Caudales de 10 años				
	Observados	Inv. Rio Gualeguaychu	Error	Inv. Nivel Provincial	Error
	m3/s	m3/s	(%)	m3/s	(%)
G_CP08W450	311.5	318.25	2.17%	366.17	17.55%
G_CP15W1000	1279.3	1242.72	-2.86%	1275.68	-0.28%
G_CP16W1050	124	138.23	11.48%	138.68	11.84%
G-CP15W1040	1222	1178.17	-3.59%	1219.67	-0.19%

8. Conclusiones y consideraciones finales

El análisis y tratamiento de las mediciones de caudales de la red hídrica de la Provincia de Entre Ríos, más el uso de los modelos hidrológicos que representan las grandes cuencas ya detalladas anteriormente, posibilitó la regionalización de la provincia y la obtención de ecuaciones de estimación de caudales máximos.

En el desarrollo del estudio para alcanzar el objetivo final, regionalizar y obtener ecuaciones para la totalidad de la provincia, se investigó de manera particular las grandes cuencas del Arroyo Feliciano y del Río Gualeguaychú, dando como resultado la regionalización y la estimación de sus caudales máximos de manera particular.

En cuanto a los objetivos específicos, se han determinado las 5 variables más adecuadas para llevar a cabo la regionalización de subcuencas, mediante la aplicación de diversos métodos estadísticos multivariados. Resultando como variables de mayor relevancia el área en un primer lugar, luego la precipitación media areal, la pendiente del cauce principal y la longitud de este cauce en un segundo escalón, y posteriormente el índice de compacidad.

Las variables elegidas, además de ser independientes entre sí, deben ser fácilmente determinables, teniendo como premisa la practicidad de las ecuaciones obtenidas, así como la verificación de sus resultados.

La investigación realizada en este proyecto dio cuenta de la falta de registro de mediciones que proporcionen información sobre el comportamiento de la gran red hídrica que conforma la provincia de Entre Ríos. Esto resulta una gran problemática, al momento de resolver una situación donde intervienen aspectos hídricos en el diseño de una obra hidráulica o vial.

8.1. Conclusiones particulares de la Investigación de la cuenca del arroyo Feliciano

Se determinaron 4 regiones hidrológicamente homogéneas o de similar comportamiento hidrológico y se cuantificó la magnitud de sus variables físicas características, lo cual permite que los resultados obtenidos sean un insumo de futuros proyectos e investigaciones, ya que es posible identificar a qué región pertenece una subcuenca según su área, índice de compacidad y pendiente.

Se elaboraron fórmulas simples que permiten la estimación de caudales máximos en la Cuenca del Arroyo Feliciano, alcanzando un porcentaje de errores menores al 20%, al comparar con los resultados obtenidos del modelo hidráulico.

8.2. Conclusiones particulares de la Investigación de la cuenca del río Gualeguaychú

Se determinaron 4 regiones hidrológicamente homogéneas o de similar comportamiento hidrológico. Cada una de estas regiones cuenta con una ecuación de estimación de caudal máximo para dos años de recurrencia y una ecuación de índice creciente para obtener caudales máximos en otras recurrencias

Mediante la comparación de los caudales observados con los obtenidos mediante las fórmulas de caudales, debe establecerse un "error admisible", inevitable en la hidrología. Dicho error, como fue observado, se incrementa para recurrencias mayores, por este motivo, se debe analizar dentro de que rangos de recurrencia se producen errores aceptables, así como también advertir sobre aquellas cuencas que no se ajusten.

Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser de utilidad en estos casos al contrastarlos con los valores de los modelos hidrológicos, lo cual es de vital importancia para reducir la incertidumbre en los estudios hidrológicos de cuencas no aforadas.

8.3. Conclusiones particulares de la Investigación a nivel Provincial

Los objetivos de la investigación fueron satisfechos en los siguientes puntos:

- Se definieron obteniendo cinco regiones de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas, utilizando para definirlas metodologías estadísticas de análisis multivariado que a su vez permitieron, como se nombró anteriormente, determinar las variables significativas, luego utilizadas para definir las regiones homogéneas.
- Se desarrollaron ecuaciones regionales de caudales máximos individuales para cada recurrencia planteada, para cada una de las cinco regiones analizadas. Debido a la disparidad de los datos no se pudo obtener una única ecuación para cada región que permita, mediante un Índice de Creciente que correlacione caudales máximos con recurrencias, obtener el caudal para distintas recurrencias.

8.4. Consideraciones Finales

La investigación realizada en este proyecto dio cuenta de la falta de estaciones de aforo en la extensa red hídrica de la provincia de Entre Ríos lo que dificulta hallar ecuaciones de regionalización a partir de datos observados debiendo recurrir a complementarlos con resultados de modelación hidrológica.

Como resultado del estudio se brindan ecuaciones prácticas que serán de utilidad para estimación de caudales máximos en forma preliminar. Las mismas no pretenden reemplazar la aplicación de modelos hidrológicos, sino que por el contrario pueden brindar resultados que convaliden a los obtenidos con estos modelos implementados en cuencas no aforadas que carecen de datos para su calibración.

Como comentario adicional, se recomienda que en estudios sobre subcuencas que pertenezcan a la cuenca del río Gualeguaychú o a la cuenca del arroyo Feliciano se utilicen las ecuaciones obtenidas en las investigaciones particulares de estas grandes cuencas cuyos resultados han verificado mayor

precisión que los obtenidos a partir de las ecuaciones del estudio a nivel Provincial.

9. Bibliografía

- Justo Domé y Asociados S.R.L. (2019). *Modelo Hidrológico, Cuenca del Arroyo Feliciano, puente en Ruta Provincial N°5*. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- QGIS.org. (2022). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1972). *Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs and Mathematical Tables*.
- Alvarez Olguín, G., Hotait Salas, N., & Sustaita Rivera, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería Investigación y Tecnología, 3*, 277-284.
- Andrews, F. (1972). *Plots of High-Dimensional Data*. The International Biometric Society.
- Bacchiega, D., Bertoni, J. C., & Maza, J. A. (2004). *Pericia Hidraulica referida al Expediente N°1341/2003*.
- Bonomi, I. R. D., Bruno, S. M. E., Collante Wojcicki, M. D., Gimenez, V. E., Margasin, A. D., & Margheim, J. L. (2016). Análisis de Información Pluviométrica para las Principales Cuencas de la Provincia de Entre Ríos. *Tecnología y Ciencia Universidad Tecnológica Nacional, 16*(32), 198-207.
- Caamaño Nelli, G., Rico, A., & Dasso, C. (2012). El Modelo DIT 3p para Predicción de Lluvias Máximas. En . *Libro de Trabajos del III Taller sobre Regionalización de Precipitaciones Máximas*. (pp. 71-82). UNR Editora.
- Cassalho, F., Beskow, S., Vargas, M. M., Martim de Moura, M., Fernandes Ávila, L., & Rogério de Mello, C. (2017). Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 22*(27). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160064>

- Chiang, S.-M., Tsay, T.-K., & Nix, S. (2002). Hydrologic Regionalization of Watersheds. I: Methodology Development. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce - J WATER RESOUR PLAN MAN-ASCE*, 128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:1(3))
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. En *Hidrología aplicada*. Mcgraw Hill Interamericana. S.A.
- Clarke, R. T., & Brusa, L. C. (2002). *The effects of errors in measuring drainage basin area on regionalized estimates of mean annual flood: a simulation study* (Vol. 309). IAHS Publ. <https://www.researchgate.net/publication/241375495>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Dalrymple, T. (1960). *Flood-Frequency Analyses Manual of Hydrology: Part 3. Flood-Flow Techniques*.
- Daniil, E. I., & Lazaridis, L. S. (2005). Hydrologic modeling considerations for flood management in ungaged basins. En *Technology Rhodes island*. <https://www.researchgate.net/publication/277311195>
- de Andrade, E. M., & Hawkins, R. H. (2000). *APLICAÇÃO DA FUNÇÃO DE ANDREWS NA AVALIAÇÃO DA REGIONALIZAÇÃO DE BACIAS EM REGIÕES ÁRIDAS E SEMI-ÁRIDAS* (Vol. 5).
- Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos. (s. f.). *Cuencas Hidrográficas*.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *DISEÑO HIDROLOGICO* (2° Edición).
- Franchini, M., & Suppo, M. (1996). Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. *Water Resources Management*, 10(3), 199-218. <https://doi.org/10.1007/BF00424203>
- Graf, J. B., Garklavs, G., Oberg, K. A., & U.S. Geological Survey, W. R. D. (1982). Time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams. En *Water-Resources Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/wri8213>

- Gumbel, E. J. (1941). The Return Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), 163-190.
<http://www.jstor.org/stable/2235766>
- Houghton, J. C. (1977). *Robust estimation of the frequency of extreme value in a flood frequency context.*
- Houghton, J. C. (1978a). Birth of a parent: The Wakeby Distribution for modeling flood flows. *Water Resources Research*, 14(6), 1105-1109.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR014i006p01105>
- Houghton, J. C. (1978b). The incomplete means estimation procedure applied to flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 14(6), 1111-1115.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR014i006p01111>
- Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(348), 158-171.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49708134804>
- Loebis, J., & Agung Bagiawan I. (2002). Prediction of runoff in ungaged catchment using geographic information systems and digital terrain model. En *PUB IAHS Decade on prediction in ungaged basins.*
- Lopez, P. v., Sato, R., Mataglia, M. I., Cattaneo, N., Masola, R., Gimenez, V., Collante Wojcocki, M. D., Sabina, B., Margasin, A., Morley, S. A., Erbetta, A., Grazidio, V., & Villanueva, G. (2020). *ESTUDIO DE TORMENTAS DE DISEÑO EN CUENCAS EXTENSAS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS* (Primera). edUTecNe.
- Mallants, D., & Feyen, J. (1990). Defining homogeneous precipitation regions by means of principal components analysis Comparing the Effects of Vetiver and Polyacrylamide on Soil Structural Stability and Erosion Indices View project IAEA Collaborative Research Project no. T21024 «The use of numerical models in support of site characterization and performance assessment studies of geologic repositories» View project. En *Article in*

- Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
<https://www.researchgate.net/publication/242331054>
- Montgomery, D. C., Peck, E., & Vining, G. G. (2006). *INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL* (3a.). CECSA.
- Paris, M. (2010). *Metodos estadisticos multivariados aplicados en Hidrologia Subteranea*. Universidad Nacional de Rio Cuarto.
- Paris, M. del C., & Zucarelli, G. V. (2004). Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Ingeniería Hidráulica En México*, XIX(4), 5-19.
- Sato, R. A. (2016). *Modificaciones en el riesgo de inundación fluvial debido al desarrollo urbano junto a ríos de llanura . Estudio de caso : la ciudad de Gualeguaychú* [Tesis de Maestría en Ingeniería en Recursos Hídricos]. Universidad Nacional del Litoral.
- Tucci Morelli, C. E. (2007). *Hidrologia, Ciência e Aplicação* (Cuarta edición). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Zamanillo, E. A., Larenze, G. R., Tito, M. J., Pérez, M. M., Garat, M. E., Gómez, P. C., Tugnarelli, M. V., Leineker, A. R., Paskosky, P. J., & Rossi, C. A. (2008). *Tormentas de diseño para la provincia de entre rios* (1a ed.). Universidad Tecnológica Nacional.
- Zimmermann, E. D. (2000). *Aplicación del modelo de simulación hidrológica SHALL3 para la evaluación de impactos provocados por riego generalizado*.

Índice

1. Introducción	1
2. Área de estudio	5
2.1. Región geográfica	5
2.2. Características climatológicas.....	5
2.2.1. Precipitación.....	6
2.3. Hidrografía	7
2.3.1. Cuenca del arroyo Feliciano	8
2.3.2. Cuenca del río Gualeguaychú	9
2.3.3. Cuenca del río Gualeguay	11
2.3.4. Cuenca del arroyo Nogoyá	13
2.3.5. Cuenca del Guayquiraro	15
2.3.6. Cuenca del arroyo Yuqueri Grande.....	16
3. Métodos utilizados	17
3.1. Aspectos hidrológicos.....	17
3.1.1. Cuenca Hidrográfica	17
3.1.2. Precipitaciones	20
3.1.2.1. Distribución Temporal de Tormentas.....	21
3.1.2.1.1. Bloques Alternos.....	21
3.1.2.1.2. Patrones Temporales (Zamanillo et al., 2008).....	22
3.1.2.2. Distribución Areal de la precipitación	23
3.1.3. Modelación hidrológica.....	23
3.1.4. Regionalización de Cuencas.....	24
3.2. Aspectos estadísticos	25
3.2.1. Análisis de Frecuencias.....	25
3.2.2. Análisis Estadístico Multivariado.....	29

3.2.2.1. Análisis de Correlación	29
3.2.2.2. Análisis de Componentes Principales	30
3.2.2.3. Agrupamiento de Conglomerados - Clustering	30
3.2.2.4. Curva de Andrews.....	33
3.2.2.5. Regresión Lineal Múltiple	34
3.2.2.6. Índice de Creciente	34
4. Cuenca del arroyo Feliciano.....	36
4.1. Recopilación de datos y análisis	36
4.2. Cálculo de Hietogramas.....	40
4.3. Explotación del Modelo Hidrológico	43
4.4. Selección de la tormenta y de la distribución de ajuste	46
4.5. Extensión del Modelo Hidrológico	50
4.6. Jerarquización de Subcuencas.....	51
4.7. Cálculo de Hietogramas para las subcuencas	55
4.8. División y explotación del Modelo Hidrológico.....	60
4.9. Parámetros de estimación	60
4.10. Análisis Multivariado y selección de variables	62
4.11. Selección de Variables y Regionalización de Subcuencas	68
4.12. Ecuación Regional de Caudales.....	81
5. Cuenca del río Gualeguaychú.....	87
5.1. Recopilación y Análisis de Datos.....	87
5.2. Análisis de distribución de la Precipitación	91
5.3. Análisis de caudales para diferentes Subcuencas	98
5.4. Agrupamiento de las Variables.....	105
5.5. Agrupamiento de las Subcuencas.....	112
5.6. Obtención de Ecuaciones y Reformulación de los Agrupamientos	115
6. Investigación a nivel provincial.....	138

6.1. Información hidrológica.....	138
6.2. Caudal máximo anual.....	138
6.3. Precipitación media areal.....	149
6.4. Características físicas.....	153
6.5. Análisis multivariado de las variables.....	156
6.6. Agrupamiento de cuencas hidrológicamente homogéneas.....	162
6.7. Ecuación regional de caudales.....	174
6.8. Resultados obtenidos.....	176
6.9. Análisis de los resultados obtenidos.....	177
7. Discusión de resultados.....	181
7.1. Comparación de las subcuencas del arroyo Feliciano.....	181
7.1.1. Cuenca Paso Medina.....	181
7.1.1.1. Datos.....	181
7.1.1.2. Parámetros.....	181
7.1.1.3. Cálculo de la Precipitación Media areal.....	182
7.1.1.4. Resultado con las ecuaciones de la investigación de la cuenca particular.....	183
7.1.1.5. Resultado con las ecuaciones de la investigación a nivel provincial. 184	
7.1.2. Otros resultados de las comparaciones.....	185
7.2. Comparación de las subcuencas del río Gualeguaychú.....	186
7.2.1. Cuenca del río Gualeguaychú.....	186
7.2.1.1. Datos.....	186
7.2.1.2. Parámetros.....	186
7.2.1.3. Cálculo de la Precipitación Media areal.....	186
7.2.1.4. Resultado con las ecuaciones de la investigación de la cuenca particular.....	187

7.2.1.5. Resultado con las ecuaciones de la investigación a nivel provincial.	188
7.2.2. Resultados de otras subcuencas del río Gualeguaychú.....	189
8. Conclusiones y consideraciones finales.....	190
8.1. Conclusiones particulares de la Investigación de la cuenca del arroyo Feliciano	191
8.2. Conclusiones particulares de la Investigación de la cuenca del río Gualeguaychú	191
8.3. Conclusiones particulares de la Investigación a nivel Provincial.....	192
8.4. Consideraciones Finales.....	192
9. Bibliografía.....	194

Índice de Figuras

Figura 1.1. Inundación de arroyo Feliciano sobre Ruta Nacional N°12. Abril 2016. 2	
Figura 1.2. Desborde arroyo Las Conchas. Ruta Nacional N°12. Marzo 2007. ... 2	
Figura 1.3. Desborde del arroyo Nogoyá. Ruta Nacional N°11. Febrero 2016..... 2	
Figura 1.4. Inundación de río Gualeguaychú. Diciembre 2012..... 3	
Figura 1.5. Inundación de río Gualeguay. Abril 2016. 3	
Figura 2.1. Ubicación provincia de Entre Ríos..... 5	
Figura 2.2. Nivel anual de precipitaciones de Entre Ríos..... 6	
Figura 2.3. Hidrografía de Entre Ríos..... 7	
Figura 2.4. Ubicación de la cuenca del Arroyo Feliciano. 8	
Figura 2.5. Afluentes principales del arroyo Feliciano. 9	
Figura 2.6. Estación de aforo Paso Medina..... 9	
Figura 2.7. Ubicación de la cuenca del río Gualeguaychú en la provincia. 10	
Figura 2.8. Cauces de aporte al Rio Gualeguaychú..... 11	
Figura 2.9. Ubicación de la cuenca del río Gualeguay en la provincia. 12	
Figura 2.10. Cauces principales de la cuenca del río Gualeguay. 13	
Figura 2.11. Ubicación de la cuenca del arroyo Nogoyá en la provincia..... 14	
Figura 2.12. Afluentes principales del arroyo Nogoyá. 15	
Figura 2.13. Paso Juncué..... 16	
Figuras 3.1. Patrones Temporales..... 22	
Figura 3.2 Modelo de Dendrograma. 32	
Figura 3.3 Curvas de Andrews..... 34	
Figura 3.4. Ecuación Regional..... 35	
Figura 4.1. Estaciones de aforo – Red Hidrológica Nacional..... 36	
Figura 4.2. Análisis de Frecuencia – Serie de Caudales Máximos. 39	
Figura 4.3. Errores ECMF y ECMV. 39	
Tabla 4.2. Valor del Caudal por Distribución de Ajuste..... 40	
Figura 4.4 Curvas IDF. Cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina. 41	
Tabla 4.3. Funciones Curvas IDF. 41	
Figura 4.5. Promedio de Patrones Temporales. 42	
Figura 4.6. Distribución por Patrones Temporales. 43	
Figura 4.7. Distribución por Bloques Alternos..... 43	
Figura 4.8. Modelo Hidrológico..... 44	

Figura 4.9. Hietograma e Hidrograma Modelo HEC-HMS – Subcuenca arroyo Víboras.	45
Figura 4.10. Hidrograma Modelo HEC-HMS – Tramo 20.	45
Tabla 4.4. Caudales máximos obtenidos con Patrones Temporales.	47
Tabla 4.5. Caudales máximos obtenidos con Bloques Alternos.	47
Tabla 4.6. Menores Errores Cuadráticos Medios.	48
Figura 4.12. Comparación Pearson – Modelo Hidrológico por Patrones Temporales.	48
Figura 4.13. Comparación Pearson – Modelo Hidrológico por Bloques Alternos. 49	49
Figura 4.14. Modelo Hidrológico Extendido.	50
Tabla 4.6. Resultados de Caudales Máximos Obtenidos – Cuenca Completa.	51
Figura 4.15. Método de Jerarquización de Subcuencas.	52
Figura 4.16. Cuenca Completa del Arroyo Feliciano y Cursos de Agua.	53
Figura 4.17. Subcuencas de 1er Orden.	53
Figura 4.18. Subcuencas de 2do Orden.	54
Figura 4.19. Subcuencas de 3er Orden.	54
Figura 4.20. Delimitación de Subcuencas para Curvas IDF.	55
Tabla 4.7. Tiempos de Concentración Promedio y Duraciones de Tormenta Adoptadas.	57
Tabla 4.8. Cálculo de duración de la Tormenta.	57
Tabla 4.9 Cálculo de los Coeficientes de Abatimiento Areal y Precipitación Media.	58
Tabla 4.10. Cálculo del Hietograma.	59
Figura 4.21. Hietograma Subcuenca “Junction 22” – Recurrencia 2 Años.	59
Figura 4.22. Modelo Hidrológico – 1er Orden.	60
Tabla 4.11. Variables y Parámetros – Subcuenca “Junction 22”.	62
Figura 4.23. Coeficientes de Correlación entre Variables – Recurrencia 2 Años. 63	63
Figura 4.24. Coeficientes de Correlación entre Variables – Recurrencia 2 Años. 64	64
Figura 4.25. Análisis de Componentes Principales – Recurrencia 2 Años.	65
Figura 4.26. Método Simple o de distancias mínimas – Recurrencia 2 Años.	66
Figura 4.27. Método del Centroides – Recurrencia 2 Años.	67
Figura 4.28. Método de Ward o de mínima varianza – Recurrencia 2 Años.	67
Figura 4.29. Método Completo o de distancias máximas – Recurrencia 2 Años. 68	68

Figura 4.30. Correlación de Variables mayormente relacionadas con el Caudal. 69	
Tabla 4.12. Numeración de Subcuencas.....	71
Figura 4.31. Número Óptimo de Clusters – Recurrencia 2 Años.....	72
Figura 4.32. Dendrograma – 2 Regiones – Recurrencia 2 Años.....	73
Figura 4.33. Curvas de Andrews – Regionalización en 2 Grupos – Región 1....	75
Figura 4.34. Curvas de Andrews – Regionalización en 2 Grupos – Región 2 ...	75
Figura 4.35. Dendrograma – 3 Regiones – Recurrencia 2 Años.....	76
Figura 4.36. Curvas de Andrews – Regionalización en 3 Grupos – Región 2 ...	77
Figura 4.37. Curvas de Andrews – Regionalización en 3 Grupos – Región 3 ...	77
Figura 4.38. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 1 - Recurrencia 2 Años.....	78
Figura 4.39. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 2 – Recurrencia 2 Años.....	79
Figura 4.40. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 3 - Recurrencia 2 Años.....	79
Figura 4.41. Curvas de Andrews – Regionalización Final – Región 4 - Recurrencia 2 Años.....	80
Tabla 4.13. Relaciones de Caudales máximos – Región 1.....	82
Tabla 4.14 Promedio de Relaciones de Caudales máximos – Región 1.....	83
Figura 4.42. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 1.....	83
Figura 4.43. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 2.....	84
Figura 4.44. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 3.....	85
Figura 4.45. Ecuación Regional de Frecuencia – Región 4.....	86
Figura 5.1. Modelo Hidrológico de la cuenca del río Gualeguaychú.....	88
Tabla 5.1.Serie de Caudales Máximos Diarios Anuales.....	89
Figura 5.2. Gráfico de Distribuciones.....	90
Tabla 5.2 – Valores de la variable Q para distintas recurrencias.....	90
Figura 5.3. Gráfico de Bondad de Ajuste de las Funciones de Distribución.....	90
Tabla 5.3. Bondad de Ajuste de las Funciones de Distribución.....	91
Figura 5.4. Curvas IDF de subcuenca con cierre en Ruta Provincial N°39.....	92
Tabla 5.4. Coeficientes para las Curvas IDF de subcuenca con cierre en Ruta N°39.....	92
Tabla 5.5. Precipitación Media Areal.....	93
Figura 5.5 . Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Concepción del Uruguay.....	94
Figura 5.6. Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Concordia.....	94
Figura 5.7. Patrones de Distribución Temporal para 24 hs – Paraná.....	95

Figura 5.8. Patrones de Distribución Temporal para la Provincia de Entre Ríos. 95	
Tabla 5.6. Caudales Máximos obtenidos del Modelo Hidrológico.....	96
Figura 5.9. Caudales obtenidos en el modelo para hietogramas de bloques alternos junto con los de la función GEV.	96
Figura 5.10. Caudales obtenidos en el modelo para hietogramas de patrones temporales junto con los de la función GEV.	97
Tabla 5.7. Subcuencas del río Gualeguaychú.	98
Figura 5.11. Subcuencas del río Gualeguaychú.....	99
Tabla 5.8. Subcuencas de 1° Orden.	102
Tabla 5.9. Subcuencas de 2° Orden.	103
Tabla 5.10. Subcuencas de 10° Orden.....	104
Figura 5.12. Matriz de Correlación de Variables para 2 años de recurrencia...	107
Figura 5.13. Análisis de Componentes Principales de Variables para 2 años de recurrencia.....	108
Figura 5.14. Clusterización de Variables para 2 años de recurrencia.	109
Tabla 5.11. Valores de las variables seleccionadas para cada subcuenca.	111
Figura 5.15. Clusterización de las subcuencas.....	112
Figura 5.16. Curvas de Andrews para todas las subcuencas.	113
Figura 5.17. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 1.....	113
Figura 5.18. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 2.....	114
Figura 5.19. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 3.....	114
Figura 5.20. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 4.....	114
Figura 5.21. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 5.....	115
Tabla 5.12. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 1. 116	
Tabla 5.13. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 2. 116	
Tabla 5.14. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 3. 116	
Tabla 5.15. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 4. 117	
Tabla 5.16. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 5. 117	
Tabla 5.17. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.....	118
Tabla 5.18. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.....	119
Tabla 5.19. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.	120
Tabla 5.20. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.....	121

Figura 5.22. Clústeres correspondientes a los Grupos 1 y 2.....	123
Tabla 5.21. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 1.	124
Tabla 5.22. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 2.	124
Tabla 5.23. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 3.	124
Tabla 5.24. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 4.	125
Tabla 5.25. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ec. Grupo 5.	125
Tabla 5.26. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.....	125
Tabla 5.27. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.....	126
Tabla 5.28. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.....	127
Tabla 5.29. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.	128
Figura 5.23. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 1.....	130
Figura 5.24. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 2.	130
Figura 5.25. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 3.	131
Figura 5.26. Curvas de Andrews de las subcuencas del Grupo 4.....	131
Tabla 5.30. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 1.....	131
Tabla 5.31. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 2.....	132
Tabla 5.32. Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 3.....	132
Tabla 5.33 – Comparación de caudales modelados y obtenidos con la ecuación – Grupo 4.....	133
Tabla 5.34. Índices de Creciente por Grupo y por Recurrencia.....	133
Tabla 5.36. Resultados para recurrencias de 2 y 5 años.....	134
Tabla 5.37. Resultados para recurrencias de 10 y 20 años.....	135
Tabla 5.38. Resultados para recurrencias de 50 y 100 años.	136
Figura 6.1. Curva de frecuencia de alturas medias diarias río Paraná. Estación 3050 – Túnel Subfluvial.	140
Figura 6.2. Comparación de caudales máximos del arroyo Nogoyá con alturas del río Paraná.	141
Tabla 6.1. Serie de caudales máximos anuales.....	142
Figura 6.3. Interfaz AfMulti.	144
Figura 6.4. Selección de probabilidades y frecuencias de ajuste.....	145
Figura 6.5. Frecuencia experimental y Frecuencias de ajuste.....	146

Figura 6.6. Grafica errores cuadráticos medios de frecuencia ECMF y variable ECMV.	146
Tabla 6.2. Caudales para distintas probabilidades. Arroyo Nogoyá – Estación 3037 – RP N° 11.	147
Tabla 6.3. Resumen caudales máximos software AfMulti.	148
Tabla 6.4. Cálculo de PMA.	151
Figura 6.7. Curvas IDF subcuenca arroyo Feliciano Cierre Paso Medina.	152
Figura 6.8. Curvas de decaimiento o abatimiento areal. Arroyo Feliciano.	153
Tabla 6.5 - Características físicas generales.	153
Tabla 6.6. Parámetros físicos de las cuencas aforadas.	154
Tabla 6.7. Parámetros físicos de las subcuencas (Cuenca del arroyo Feliciano). 155	155
Tabla 6.8. Parámetros físicos de las subcuencas (Cuenca del río Gualeguaychú). 155	155
Figura 6.9. Diagrama de correlación de variables.	158
Figura 6.10. Gráfica Método de Componentes Principales.	158
Figura 6.11. Dendograma de variables.	159
Tabla 6.9. Datos de las cuencas y subcuencas para la regionalización.	161
Figura 6.13. Dendograma de grupos de cuencas y subcuencas.	163
Figura 6.13. Curvas de Andrews de Cuencas y Subcuencas en estudio.	164
Tabla 6.10. Variables de estudio Grupo 1.	165
Figura 6.14. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 1.	165
Figura 6.15. Curvas de Andrews Grupo 1.	166
Tabla 6.11. Variables de estudio Grupo 2.	166
Figura 6.16. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 2.	167
Figura 6.17. Curvas de Andrews Grupo 2.	168
Tabla 6.12. Variables de estudio Grupo 3.	168
Figura 6.18. Curvas de Andrews Grupo 3.	169
Figura 6.19. Mapa con la cuenca y las subcuencas del Grupo 3.	170
Tabla 6.13. Variables de estudio Grupo 4.	171
Figura 6.20. Mapa con cuencas y subcuencas del Grupo 4.	171
Figura 6.21. Curvas de Andrews Grupo 4.	172
Tabla 6.14. Variables de estudio Grupo 5.	172
Figura 6.22. Mapa con la cuenca y subcuencas del Grupo 5.	173
Figura 6.23. Curvas de Andrews Grupo 5.	174
Tabla 6.15. Ecuación regional de caudal Grupo 1 TR 2 años.	175

Tabla 6.16. Ecuación regional de caudal para todos los grupos para todos los tiempos de recurrencia.	176
Tabla 6.17. Errores relación de caudales Grupo 1.	177
Tabla 6.18. Errores relación de caudales Grupo 2.	178
Tabla 6.19. Errores relación de caudales Grupo 3.	178
Tabla 6.20. Errores relación de caudales Grupo 4.	179
Tabla 6.21. Errores relación de caudales Grupo 5.	179
Figura 6.24. Segregación de grupos.	180
Figura 7.1 Curvas IDF. Cuenca del arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina. 182	
Figura 7.2. árbol de decisiones.	183
Figura 7.3. árbol de decisiones.	184
Tabla 7.1. Comparaciones en otras subcuencas.	185
Figura 7.4 Curvas IDF. Cuenca del río Gualeguaychú con cierre en RP39.	186
Figura 7.5. árbol de decisiones.	188
Tabla 7.2. Comparaciones en otras subcuencas.	189

Regionalización de caudales máximos en cuencas hidrográficas de la Provincia de Entre Ríos



María Inés Mastaglia, Rodolfo Sato, Tomas Kohan, Roxana Ramírez, Andrea Margasin, Vanesa Giménez, Ángel Villaverde, Diana Skidelsky Spahn, Floriana Russian, Matías Bidegorry, Ricardo Grilli, Eliana Sturtz, Diego Kessler

La investigación consiste en el estudio y regionalización de caudales máximos de las subcuencas de Entre Ríos. La provincia cuenta con solo seis estaciones de aforo de caudales con mediciones en un periodo superior a 20 años.

Partiendo de modelos hidrológicos calibrados de dos grandes cuencas, el Rio Gualeguaychú y el Arroyo Feliciano. Se analizaron distintas distribuciones temporales de tormenta, para determinar en cual distribución los caudales simulados se aproximan a los observados. Además, se modelaron las subcuencas para tormentas de distintas recurrencias.

Luego, se realizó un análisis estadístico multivariado que permitió definir regiones hidrológicamente homogéneas y seleccionar los parámetros de mayor incidencia en los valores de caudales máximos.

Como resultados se obtuvieron fórmulas de estimación de caudales en base a las características de las subcuencas y la precipitación media areal para una recurrencia de 2 años. Luego, se definieron ecuaciones regionales de frecuencia, que permiten calcular un índice de creciente, el cual permite estimar el caudal para cualquier recurrencia.

Finalizadas las investigaciones mencionadas, se procedió regionalizar toda la provincia, utilizando una metodología similar y extendiendo los datos según su correlación de caudal. Se obtuvo 5 regiones, con 5 ecuaciones de caudales máximos para cada región y recurrencia.